

Parte D

Sobre la estructura y el método en las ciencias físicas

12

Sobre la naturaleza de los conceptos

13

Sobre la dualidad y crecimiento de la ciencia

14

Sobre el descubrimiento de las leyes

210 AD3701319

Sobre la estructura y el método en las ciencias físicas

«Tanto en las Matemáticas como en la Filosofía Natural la investigación de las cosas por el método de análisis debe siempre preceder al método de composición. Este análisis consiste en hacer experimentos y observaciones y extraer conclusiones generales por inducción, y no admitir objeciones a las mismas, sino están corroboradas por experimentos u otras verdades ciertas, pues las hipótesis no están consideradas en la filosofía experimental y, aunque el argumento deducido por inducción de experimentos y observaciones no constituya una demostración de conclusiones generales, es, sin embargo, el mejor modo de argumentar lo que admite la naturaleza de las cosas y puede considerarse más poderoso cuanto más general es la inducción. Y si no hay ninguna excepción en los fenómenos, la conclusión puede pronunciarse con toda generalidad. Pero si algún tiempo después se produce alguna excepción entre los experimentos, habrá que denunciar el que se produzcan dichas excepciones. Por este camino de análisis avanzamos de los compuestos a los ingredientes y de los movimientos a las fuerzas que los producen; y, en general, de los efectos a las causas y de las causas particulares a las más generales, hasta que el argumento termina en la más general. Éste es el método de análisis: y la síntesis consiste en suponer como principios las causas descubiertas y establecidas y, con ellos, explicar los fenómenos que de ellos se derivan y comprobar las explicaciones...»

ISAAC NEWTON, *Opticks*

Sobre la estructura y el método de las ciencias físicas

Desde que la ciencia existe, ha habido comentarios acerca de la misión y procedimientos de la misma. Desde Aristóteles a Galileo, desde Roger Bacon a nuestros días, casi todos los grandes científicos y filósofos han contribuido con sus puntos de vista y opiniones. Ninguna laguna ha quedado, aparentemente, sin tratar en una materia tan vasta y tan competentemente estudiada. Pero, incluso si esto fuera cierto, nos vamos a permitir la discusión de un modo informal de las distintas opi-

niones autorizadas de aquellos hombres que ejercieron mayor influencia en el pensamiento científico, y obtener así un punto de vista razonable desde el cual analizar el progreso y los procedimientos de la ciencia, no tanto por la exposición técnica de los problemas que surgen, sino para aumentar la comprensión y alegría del quehacer científico.

Estos tres capítulos de la parte D, continúan y completan el ciclo comenzado en el capítulo 3, «Sobre la naturaleza de la teoría científica». Se sugiere volver a leer los capítulos 3, 12, 13 y 14 juntos cuando se llegue al final del libro.

Capítulo 12

Sobre la naturaleza de los conceptos

12.1 Introducción: La investigación de las constancias en el cambio

Cuando se pregunta «¿qué es la ciencia?», lo que, verdaderamente, se quiere decir es: «¿qué hacen los científicos, actualmente, en sus despachos y laboratorios, y qué parte de su trabajo anterior sigue siendo útil a los hombres en un campo dado?» Como son muchos los físicos a los cuales, durante los cuatro últimos siglos, les ha resultado cada vez más difícil comunicar lo que hacen a los no científicos, examinemos en primer lugar las tareas del científico mediante una analogía en la que interviene su colega más inmediatamente asequible: el antropólogo. En este caso, el laboratorio —dice Margaret Mead en *Samoa*— es una isla de gente primitiva. El antropólogo se sumerge en la vida de la comunidad para observarla, estudiar sus características, pero, por supuesto, el ojo no puede ver, y la mente no puede captar características significativas dentro del caos de movimientos y sonidos, hasta que hayan cristalizado a través de su experiencia los conceptos necesarios con los cuales descubrir, pensar y describir relaciones en la vida de la comunidad. Conceptos como los de *familia*, *dirigente*, *agrupación*, *aptitud mental* y otros semejantes, pertenecen a lo que llamaríamos de «sentido común» de nuestro investigador; corresponden en Física a las nociones de *espacio*, *tiempo*, *distancia*, *velocidad*, etc. Otro conjunto de conceptos para nosotros más interesantes, surgen del fenómeno en particular que estudiamos. El antropólogo aprende el lenguaje y costumbres de la gente y descubre e inventa nuevas frases gramaticales importantes para la organización de sus observaciones y su comprensión de la comunidad, por ejemplo el término «taupo», que en lengua samoana indica el ceremonial de la princesa de la casa, y el término «uso», que significa un niño del mismo sexo. De igual modo, el científico físico, algunas veces con gran dificultad, debe extraer de su experiencia nuevas ideas como el *campo eléctrico* o la *valencia*.

Nuestro antropólogo puede hallar que en el grupo que está estudiando no aparece la manifestación de muchos conceptos sin los cuales nuestra sociedad no podría operar; por ejemplo, algunos elementos del código moral de la civilización oc-

cidental, el conocimiento de la propia edad, o aun el simple conocimiento y nombre de muchos colores; así también la ciencia tiene que aprender, a menudo por un camino arduo, que en la naturaleza inanimada no hay equivalentes a conceptos tan comunes como aprecio mutuo o simultaneidad absoluta.

La formulación o «descubrimiento» de nuevos conceptos ayudan al antropólogo a interpretar gradualmente lo que originalmente aparecía sin significado, sin fundamento o como vida «primitiva» del pueblo, y surge así un modelo complejo, quizá un poco rígido. Aun sus propios conceptos primarios más comunes, pueden sufrir cambios profundos. La palabra *ley*, por ejemplo, podrá tener diferentes acepciones para distintas culturas, del mismo modo que la idea de *fuerza* en Física (y en general de todos los conceptos técnicos que surgen del vocabulario común) tiene ahora un significado distinto del que se da a la misma palabra fuera de la ciencia.

Por fin, nuestro antropólogo puede llegar a descifrar el problema original, dando una explicación de la organización familiar y política de aquella gente, sus valores estéticos personales, sus creencias y prácticas religiosas, sus métodos económicos, etc. Quizá pueda reconstruir su historia y aun aclarar el comportamiento de otro grupo, el suyo propio, en relación con aquella cultura. De cualquier modo, es evidente en este ejemplo que su tarea no se termina después de reunir un conjunto de fenómenos que en un principio son directamente observables; por el contrario, esto no sería sino el principio, el estímulo para la parte, realmente, importante de sus trabajos. Podemos conservar, con todas sus limitaciones, la imagen análoga del físico como explorador de un universo de sucesos y fenómenos, del cual intenta hallar su esquema y significado.

12.2 Ciencia y no ciencia

Podemos ahora decir que la Ciencia es la investigación sin fin que busca descubrir hechos, establecer relaciones entre las cosas y descifrar las leyes que rigen el devenir del mundo. Pero váyamos más allá. Mientras no intentemos proponer una definición escueta del complejo concepto global «ciencia», quizá podamos estar de acuerdo en principio en que *la principal tarea de la Ciencia es establecer, en la barahúnda de fenómenos una estructura coherente que tenga orden y significado* y de esta manera interpretar y superar a la experiencia directa. En palabras de Einstein, «el objeto de todas las ciencias es coordinar nuestras experiencias y aunarlas en un sistema lógico». Y Niels Bohr está de acuerdo con esto cuando dice: «El propósito de la ciencia es extender el alcance de nuestra experiencia y reducirla a un orden».

Probablemente parecerán estas afirmaciones demasiado amplias; pues lo mismo podría decirse del arte o de la filosofía. Así, el poeta T. S. Eliot ha dicho: «La función de todo arte es darnos una percepción de un orden en la vida, imponién-

doselo»; y A. N. Whitehead define la filosofía especulativa como «la tarea de construir un sistema coherente, lógico y necesario de ideas generales mediante el cual puedan interpretarse todos los elementos de nuestra experiencia». Realmente en ciencia, como en arte y filosofía, el esfuerzo intelectual se dirige al descubrimiento de un modelo, orden, sistema y estructura, bien sea tan primitivo como la sucesión de las estaciones o tan ambicioso como una síntesis cosmológica. En este sentido, la ciencia no es sino una faceta de la gran aventura intelectual, el intento de comprender el mundo en cada uno de sus aspectos. La búsqueda de regularidades en el curso de las experiencias, es tan fundamental y una preocupación tan universal de la vida inteligente que, como la mayoría de los filósofos griegos, podemos considerar la mente como el principio que produce el orden. Encontramos así, sin sorpresa, entre los primeros grandes hombres de ciencia, un artista como Leonardo da Vinci y un clérigo como Copérnico; de hecho, el mismo origen de la palabra *ciencia* (del latín *scire* = saber, aprender), indica la amplitud de su atractivo y la profundidad de sus raíces.

Por supuesto que no deben negarse las diferencias fundamentales y distintivas que separan la ciencia de lo que no es ciencia. Existen puntos obvios que separan una de otra; por ejemplo, las motivaciones del investigador, que se tratarán con más detalle en el capítulo 13. Predecir la Naturaleza para así controlarla, comprenderla para así disfrutar de ella, son los principales motivos que tiene la ciencia para su estudio, en tanto que la comprensión de la Naturaleza por el arte está motivada por un esfuerzo hacia la autorrealización, la proclamación y el ennoblecimiento del propio espíritu del hombre. Estos motivos de la ciencia y el arte son, en cierto sentido, complementarios, no contradictorios, e iluminan las dos vertientes del hombre. Coexisten los dos, en cierto modo, en todo individuo. Sería artificial distinguir entre el triunfo del científico y el del artista en Johannes Kepler cuando escribía en la *Armonía del mundo* (1619), con ocasión de publicarse su tercera ley del movimiento planetario:

«...Lo que profeticé hace veintidós años, tan pronto como encontré que las órbitas de los cuerpos celestes eran cinco, como el número de sólidos (regulares), lo que yo creía ciegamente mucho antes de haber visto las Armonías de Ptolomeo, lo que prometí a mis amigos en el nombre de este libro que había bautizado antes de tener 16 años, lo que me impelía a buscarlo como un fin, aquello por lo que me uní a Tycho Brahe, aquello por lo que me establecí en Praga, por lo que he pasado la mayor parte de mi vida en cálculos astronómicos, al fin lo he descubierto, he visto que era verdad, más allá de mis fundadas esperanzas. No han pasado dieciocho meses desde que vi el primer rayo de luz, tres meses desde que un Sol glorioso, sin nubes, se elevó sobre mí. Nada me detendrá; perdonaré mi éxtasis sagrado. Triunfaré sobre la humanidad por la honesta confesión de que he robado los vasos

sagrados de los egipcios para elevar un tabernáculo a mi Dios, más lejano que el país de Egipto. Si me perdonáis, me regocijo; si os irritáis, no puedo evitarlo. Este libro ya se ha escrito; la suerte está echada. Que me lean ahora o en la posteridad, no me preocupa...»

Existe un segundo punto de diferencias mucho más claro que el primero entre ciencia y no ciencia; reside en la clase de conceptos y reglas que utiliza el científico y el tipo de argumentos que le inducen a decir: «Sí, comprendo y estoy de acuerdo». Este punto ocupará, hasta cierto punto, nuestra atención, y también un tercero: la observación de que en el transcurso del tiempo, a pesar de las grandes innovaciones y revoluciones, se han acumulado en la ciencia un conjunto de esquemas conceptuales internacionalmente aceptables, básicos y claramente duraderos, como puede decirse que no se ha dado en ninguna otra de las empresas humanas. En seguida surge la pregunta de cómo puede el hombre, de vida tan corta y tan falible, penetrar en verdades tan complejas, descubrir esquemas permanentes y obtener acuerdos generales. Para el trabajo científico, como para cualquier otra exploración, se requiere el esfuerzo conjunto de toda la persona, su observación, reflexión, experimentación, imaginación y cierta medida de intuición. Siendo humano, el hombre falla más a menudo que acierta, y aun sus éxitos y fallos, pueden invertirse a la luz de posteriores adelantos. Muchas veces no podrá explicar de modo satisfactorio las razones de dedicarse a este trabajo y los pasos por los cuales va adelantando; y si es nuevo en tales lides, será desmentido, probablemente, por alguno de sus colegas. Y sin embargo el *resultado* de esta incierta actividad humana, cual es el crecimiento del cuerpo de la ciencia, constituye innegablemente un éxito, una empresa vigorosa, llena de descubrimientos, en franco contraste con la fragilidad y confusión de sus creadores humanos. Consideraremos esta paradoja en los capítulos siguientes, pues es clave para una comprensión de las actividades del científico y de las características de su trabajo.

Inmediatamente surge una respuesta por sí misma: Puede haber algún truco, *algún método* que sigan los científicos para resolver sus problemas. Después de disponer de esta opinión, buscaremos, profundamente, una respuesta alternativa, a saber: que hay, quizás, algún mérito especial en el vocabulario propio, en los instrumentos mentales particulares con que los científicos analizan el mundo que les rodea.

12.3 La falta de un método único

Con frecuencia se ha sugerido que el éxito de la ciencia era el resultado de aplicar «el método científico». Pero si por «método científico» significamos las normas y reglas según las cuales los científicos de ahora y del pasado han realizado su trabajo, dos cuestiones se presentan de modo obvio: En primer lugar, aquí como en toda tarea, no hay uno, sino muchos métodos y muy variados, y, en segundo lugar, estos distintos métodos se suelen exponer después de realizar el trabajo y, por tan-

to, resultan más bien artificiales. Se comprende el deseo de establecer *algún* procedimiento preciso o conjunto de reglas a seguir en todo trabajo científico, pues beneficiaría grandemente todos los campos de la enseñanza; pero como en la búsqueda de la piedra filosofal, esta esperanza ha tenido que ser abandonada. En tiempo de Francis Bacon y Descartes, a comienzos del siglo XVII era aún razonable esperar que existieran estas claves todopoderosas para la riqueza, la salud y la sabiduría, pero el veredicto de los tres siglos que han seguido ha resultado totalmente negativo. Ya en 1776, el químico Josef Priestley decía «que realmente había poco *misterio* en la filosofía experimental y que los descubrimientos (que algunas personas gustan de considerar como grandes y maravillosos), habían sido hechos con muy poca *sagacidad* o incluso sin *proyecto*...»

Las palabras de Priestley, aunque presentan una generalización excesiva que no se justifica por sus propias investigaciones cuidadosamente preparadas, son, sin embargo, el antidoto apropiado para el otro extremo de la opinión que consideraría la ciencia como un esquema especial e infalible, en un progreso continuo de éxito en éxito con la precisión de una máquina que marcha suavemente. Al contemplar la historia de los descubrimientos científicos, en seguida nos damos cuenta de que no hay un procedimiento regular único. Los científicos se han diferenciado siempre entre sí, tanto por temperamento como por las características de su trabajo, del mismo modo que pueden diferenciarse entre sí los compositores. Algunos avanzan paso a paso con la seguridad de un Bach, otros se mueven entre las ideas con el abandono de un Schumann. Entre los grandes científicos ha habido grandes aventureros y gente reclusa, artesanos autodidactas y aristócratas, santos y villanos, místicos y hombres de negocios, reaccionarios y rebeldes. George Sarton dice acerca de ellos en su *The Study of the History of Science*:

«...Sus maneras y costumbres, sus reacciones temperamentales difieren grandemente e introducen infinidad de caprichos y fantasía en el desarrollo de la ciencia. Esto puede desagradar al lógico, pero el humanista sonríe.»

«Felizmente, tales diferencias son más favorables que desfavorables para el progreso de la ciencia. Así como son necesarios toda clase de hombres para formar una comunidad, agradable o desagradable, así también se necesitan toda clase de científicos para desarrollar la ciencia en todas las direcciones posibles. Algunos son agudos y de mente estrecha, otros, superficiales y de mente amplia. Muchos científicos, como Aníbal, saben conquistar, pero no utilizar sus victorias. Otros son colonizadores, mas no exploradores. Otros son pedagogos. Otros desean efectuar medidas de todas las cosas con más precisión de lo que se había hecho antes. Esto puede conducirlos a descubrimientos fundamentales o hacerles fallar y ser considerados como pedantes insufribles. Esta lista podría continuar sin fin.»

El proceso de los descubrimientos ha sido tan variado como el temperamento de los científicos. Aun cuando es bien cierto que los proyectos de investigación individual casi nunca son espectaculares, pues cada investigación viene a ser una rutina lógicamente coherente y cabal dentro del ámbito prescrito, ocasionalmente algunas de las teorías más importantes han resultado de extraer conclusiones falsas de hipótesis erróneas, o de una falsa interpretación de un experimento malo. Unas veces, un solo experimento proporciona bienes insospechados; otras, el experimento más cuidadosamente planeado no ha alcanzado, por un pequeño margen, el efecto esencial y también puede suceder que un experimento aparentemente importante haya sido rechazado por un científico que, agarrándose a una teoría suya «refutada», emerge triunfante cuando dicho experimento resulte defectuoso después de todo. Incluso los esquemas conceptuales históricos de la Ciencia captaron en primer lugar la mente de la manera *aparentemente* más casual o impredecible.

Para citar dos famosos ejemplos, Darwin decía que había obtenido «una teoría con la cual trabajar» mientras leía, «por entretenimiento», el tratado de Malthus sobre la población. Una de las contribuciones fundamentales de Kekulé a la química, le vino de repente durante un momento de relajación mental. Cosas similares han sucedido a los científicos en todos los campos.

Por otro lado, hombres competentes de todas las épocas, que tuvieron en sus manos todos los «hechos significativos» para realizar un importante hallazgo, solamente sacaron conclusiones triviales o que resultaron equivocadas. Otros construyeron teorías correctas que, en apariencia, estaban en violenta contradicción con ciertos hechos. De todo esto veremos abundantes ejemplos. Incluso el trabajo del poderoso Galileo, visto retrospectivamente, en ocasiones parece saltar de error en error hasta alcanzar la respuesta correcta con la certidumbre instintiva de un sonámbulo.

En el capítulo 14 escucharemos las opiniones de hombres de ciencia relativas a los métodos de investigación; pero esta visión superficial es ya suficiente para llegar al sentimiento de que el éxito en la ciencia no depende tanto de un método único de trabajo como de algún mecanismo peculiar en el que intervienen dos factores: la contribución individual del científico, y el cuerpo de doctrina en el cual se reúnen las distintas contribuciones individuales, completándose y modificándose, cooperando y compitiendo unas con otras. Podríamos establecer aquí una burda analogía si comparamos la estructura de la ciencia a un hormiguero; el éxito de la construcción de aquella compleja y funcional habitación, se debe no a la diversidad en el comportamiento de los insectos individuales, sino a la maravillosa coordinación de innumerables esfuerzos solitarios. El mecanismo de coordinación de estos insectos sociales es aún un misterio, pero en el caso de la ciencia, puede decirse algo positivo. Para ello volveremos a la otra posibilidad expuesta al final de la sección anterior: Al asombroso y polifacético poder que reside en los conceptos utilizados por los científicos.

12.4 Conceptos físicos: definiciones operacionales

Todo esfuerzo inteligente tiene un pie en la observación y otro en la contemplación. Los científicos han llegado a limitarse, de un modo gradual, a ciertos *tipos* de observación y procesos del pensamiento. Una «limitación» eminentemente sorprendente es el deseo tácito de los científicos de asegurarse que, *en un argumento dado, están discutiendo los mismos conceptos*. El deseo de claridad es —por supuesto— general, y aquí encontramos un esquema para lograrlo particularmente fructífero, aun a costa de algunos sacrificios.

Consideremos un ejemplo sumamente sencillo. Supongamos que se trate de determinar las dimensiones o el volumen de un cuerpo, su carga eléctrica o su composición química; los especialistas llamados para resolver este problema comprenderían claramente lo que se les pedía, porque todos ellos seguirían independientemente operaciones matemáticas y manuales similares para dar sus respuestas, aun cuando éstas no estuviesen completamente de acuerdo. (Si la palabra *similar* en la frase anterior resulta confusa, podemos ir más lejos y decir que estos hombres, previa consulta mutua, estarían de acuerdo en seguir *exactamente* las mismas operaciones.) Supongamos que las respectivas determinaciones de la longitud de una arista de un bloque sean 5,01 cm, 5 cm, 4,99 cm y 5,1 cm. Lo importante aquí no es el desacuerdo en los valores numéricos obtenidos o en la precisión de las medidas, sino el acuerdo en el tipo de contestación dada. No dicen, por ejemplo, «tan largo como un espárrago en primavera», «cinco veces la anchura de mi dedo», «mucho más largo que ancho», o «más bien corto». Evidentemente, la frase «longitud de la arista de un bloque» significa lo mismo para los cuatro experimentadores, y podemos estar casi seguros de que al consultarles, los cuatro aceptarán el resultado de $5,03 \pm 0,04$ cm. No importa el metro que utilizaron, pues todos los fabricantes de aparatos de medida tienen la misma obligación legal de comprobar sus productos en función de patrones universales cuidadosamente mantenidos. En conjunto, casi toda medida realizada en el laboratorio es, en cierto sentido, una comparación entre los observables y algún patrón bien conocido aceptado por la comunidad. Gran parte del éxito y rápido crecimiento de la ciencia depende de acuerdos de este tipo, pues está claro que en tales circunstancias las energías del investigador no están mermaidadas continuamente por preocupaciones poco fructíferas acerca de definiciones y reglas de procedimiento. Así es cómo el trabajo de muchos siglos puede combinarse, a través del tiempo, en una marcha continua.

Por supuesto, hay grandes áreas de posibles desacuerdos en los científicos, pero se pueden obviar recurriendo, a menudo, a ciertas medidas que ambos interlocutores (correcta o equivocadamente) reconocerán con el tiempo que dan la razón a uno u otro. Una de las características más importantes de la física moderna, es la

rapidez con la que desaparecen la mayor parte de las diferencias de opinión.* El secreto de esta armonía y continuidad en la Física (que se han idealizado algo en el párrafo anterior) reside, en gran parte, en la *naturaleza de los conceptos y sus definiciones*. Por ejemplo, el concepto «longitud de un objeto», tal como se usa en Física, está definido, en último término, por las mismas *operaciones* realizadas en la medida. La pregunta: «¿cuál es la longitud de un bloque?» es, para todos los fines prácticos, idéntica a «¿cuál es la diferencia entre los números que figuran en las dos marcas de una regla graduada concreta que coinciden con las esquinas adyacentes del bloque?».

Esta última frase contiene un ejemplo abreviado de lo que llamaremos *definición operacional*, en este caso de longitud, y, aunque parezca complicada y no pueda utilizarse explícitamente, nuestros cuatro expertos que están midiendo la longitud pueden considerarla como el «verdadero significado» de la longitud de un bloque, del cual se dispone para zanjar cualquier disputa que pudiera surgir. En principio, todos los conceptos que se usan en Física pueden aclararse en términos de estas definiciones operacionales. Éste es uno de los mecanimos más importantes por los que se hace posible la mutua comprensión entre los científicos, pues es menos probable interpretar equivocadamente las operaciones que las palabras.

Como ha estado constantemente implícito en lo anteriormente expuesto, no todos los conceptos en ciencia pueden definirse por operaciones *manuales*. La velocidad instantánea, por ejemplo, fue definida por la pendiente de una línea recta, tangente a la curva «distancia en función del tiempo»; ésta es una operación mental o matemática. Pero tales definiciones se convierten en un conjunto nada ambiguo de normas para todos los científicos que han trabajado en ese campo, y esto explica por qué su vocabulario no es, regularmente, tema de discusión.

Resulta revelador —mejor todavía, casi indispensable para un conocimiento real de los conceptos físicos— intentar por sí mismo definir, operacionalmente, todos los términos importantes usados en los capítulos previos, tales como la aceleración, fuerza, masa, etc. Como ha dicho el físico y filósofo americano P. W. Bridgman, «el verdadero significado de un término hay que buscarlo observando lo que el hombre hace con él, no lo que dice acerca del mismo.**

En este momento, posiblemente se plantean al lector varias cuestiones confusas. Si se objetase que la definición operacional dada aquí está lejos del significado

* Una comparación con otras disciplinas puede ser confusa, pero éste es un buen lugar para intercalar que los escritos sobre la historia y la filosofía de la ciencia en este libro como en otros son tradicionalmente materia fácilmente sujeta al desacuerdo y al debate, no sólo durante unos años, sino, quizás, para siempre.

** En su libro *Logic of Modern Physics*, New York, Macmillan (1927), breve, pero influyente, describe un moderno enfoque de la ciencia; en particular discute extensamente las definiciones operacionales de los conceptos. Las primeras cien páginas son una lectura excelente para los alumnos de este nivel de estudio.

de la longitud que da el sentido común, la objeción sería perfectamente correcta y se habría dado en la diana de una verdad importante. Los conceptos de la vida diaria parecen perfectamente claros, y, en cambio, los científicos, enigmáticos. Sin embargo, un ligero examen muestra que lo que ocurre es, precisamente, lo contrario. Las palabras corrientes son, por lo general, tan flexibles y poco definidas, tan susceptibles de una matización emocional y equívoca, que nuestra tarea ha de ser construir un vocabulario especial para la ciencia e insistir en el uso *riguroso* del mismo; hábito de gran utilidad, que los científicos heredaron de los lógicos escolásticos. Podríamos tener, entonces, la sensación de que tal definición de longitud, simplemente nos dice cómo medir, de acuerdo a una convención preestablecida, pero no lo que la longitud «sea realmente». Una vez más, esto es correcto y debemos aceptar las limitaciones de la ciencia moderna; su tarea no es hallar «lo que las cosas sean realmente». Estamos tocando aquí un problema que se encuentra en el mismo corazón de la ciencia, a saber: qué significa la realidad para el hombre del laboratorio. Por el momento, tomemos la contestación del gran matemático y filósofo de la ciencia francés, Henri Poincaré, que a principios de siglo explicaba la actitud operacional frente a los conceptos físicos, de este modo:

«Cuando decimos que la fuerza es la causa del movimiento, hablamos en términos metafísicos, y esta definición, si nos satisficiera, sería absolutamente estéril. Pues una definición útil debe enseñarnos cómo *medir* la fuerza; esto nos basta; no es absolutamente necesario que nos diga lo que la fuerza es *en sí*, ni si es la causa o el efecto del movimiento.»

Por último, pudiera llenarnos de perplejidad el que una magnitud tan simple como es la longitud, no pueda determinarse con exactitud «perfecta» y podríamos preguntar por qué decíamos que «la longitud de la arista de este bloque es $5,03 \pm 0,04$ centímetros. El término $\pm 0,04$ cm se llama *error probable*; significa que existe la misma probabilidad para que otra medida posterior del objeto se encuentre entre 4,99 y 5,07 cm. Todas las medidas, excepto el simple hecho de contar, deben contener algún error o incertidumbre, cualquiera que sea el cuidado con que se realice la operación.

Pero aunque este error sea pequeño, ¿podremos construir una ciencia *exacta* sobre conceptos definidos por medidas necesariamente inciertas? Esta paradoja se resuelve al considerar que: en primer lugar, la palabra «error» no tiene en la ciencia el significado que se le da en la conversación corriente a «falso», «equivocado» o «erróneo»; una medida puede considerarse «exacta» cuando conocemos el intervalo de valores que pueden obtenerse al repetir las medidas. Para decirlo sucintamente, *una medida es exacta si se conoce la magnitud aproximada del error en sus conclusiones cuantitativas*. En segundo lugar (y esto se repetirá frecuentemente), la ciencia no se construye a partir de certezas absolutas, sino de relaciones entre observables. Sabemos que los observables pueden definirse y medirse solamente con

alguna incertidumbre; y no pediremos más a las relaciones entre ellos, dejando la búsqueda de verdades absolutas, aunque nos apene, a otros campos del pensamiento.

12.5 Conceptos y exposiciones «sin significado» físico

El resultado de una definición operacional tan trivial como la de la longitud, puede sorprendernos. En la teoría especial de la relatividad, definiciones rigurosas de este tipo llevan a resultados inesperados, como el que la longitud de un cuerpo depende de la velocidad con que se mueve respecto al observador, hecho que explica algunas observaciones que no habían podido explicarse antes. Uno de los resultados del trabajo de Einstein fue despertar en los científicos el sentimiento de que los conceptos de la física, para que sean aceptables, deben tener, en principio, un claro significado en términos de posibles operaciones. Se vio, entonces, que ideas tácitamente aceptadas conducían a serias contradicciones en algunas partes de la física teórica, pues, por su misma formulación, no podían relacionarse con ninguna posible actividad u operación de laboratorio. Por ejemplo, los conceptos de espacio y tiempo, modificados por la teoría de Einstein, se habían definido anteriormente sin una relación específica a operaciones con metros, señales luminosas, relojes de péndulo y cosas semejantes, sino de un modo intuitivo y absoluto. Una referencia clásica aquí son las afirmaciones de Newton en las primeras páginas de los *Principia*:

«El tiempo absoluto, real y matemático, por sí mismo y por su propia naturaleza, fluye igualmente sin relación a nada externo, y se llama, por otro nombre, duración.»

Fijémonos en la frase «sin relación a nada externo», esto es, sin relación necesaria a la rotación del segundero de un reloj. Con esta definición de tiempo «verdadero», no podría esperarse efectuar su medida. Y de nuevo dice:

«El espacio absoluto, por su propia naturaleza y sin relación a nada externo, permanece siempre el mismo e inmutable.»

Hoy en día, afirmaciones como éstas, sin ningún significado operacional inherente, se las llama, a veces, «sin significado», un término quizá algo drástico pero preciso en este sentido limitado. Podemos preguntarnos si la ciencia de Newton no estaba invalidada por tales postulados básicos sin significado y la respuesta es ne-

gativa, porque Newton no dependió del uso explícito de estos conceptos en su propio trabajo científico. (Sus razones para establecerlos fueron complejas y deben atribuirse a su motivación filosófica.)

Galileo, aunque mucho más próximo a la ciencia de la Antigüedad que Newton a la ciencia escolástica a la que se oponía, vio claramente que ésta debía basarse en conceptos que tuviesen claro significado a partir de posibles observaciones. Recordemos, de nuevo, el prefacio a la definición de aceleración:

«Hemos decidido, sin embargo, considerar el fenómeno de la caída libre de los cuerpos con una aceleración tal como la que, realmente, ocurre en la Naturaleza, y hacer que nuestra definición de movimiento acelerado presente las características esenciales de este tipo de movimiento acelerado natural».

Si definimos como «sin significado» todo concepto que no pueda definirse mediante operaciones, resulta que no sólo los conceptos sino enunciados completos e incluso profundas cuestiones perturbadoras, básicamente inteligentes, podrán carecer de significado *desde el punto de vista del físico*. He aquí algunos ejemplos: «¿Cuáles son las leyes físicas que se aplicarían en un Universo completamente desprovisto de cuerpos materiales?» «¿Qué está *realmente* en reposo, el Sol o la Tierra?» «¿Dejará de existir esta mesa cuando no la observemos?» «¿Qué es en sí misma la longitud, aparte de su medida?» «¿Existen leyes naturales que el hombre nunca espera descubrir?» «E, incluso, ¿está la luz formada solamente por corpúsculos o solamente por ondas?»

Muchas de estas cuestiones fueron relacionadas por Bridgman, quien, especulativamente, aventura extrapolar este *punto de vista operacional* más allá de la ciencia diciendo:

«Yo creo que muchas de las cuestiones planteadas sobre aspectos sociales y filosóficos resultarían sin significado si se examinaran desde el punto de vista operacional. Ello, sin duda, nos conduciría en gran manera a la claridad de pensamientos si se adoptara el modo operacional de pensar en todos los campos de la investigación...»

Conviene tener cuidado en no llevar demasiado lejos este modo de pensar. La aplicación operacional rigurosa puede servir y, en efecto, se ha utilizado para atacar las especulaciones que pueden desarrollarse y, finalmente, ser fructíferas. Por ejemplo, al final del siglo XIX, el físico Ernst Mach decía que el *átomo* es un concepto físicamente sin significado, porque en aquel tiempo no había forma de observar o medir sus propiedades individuales, discretas. Sin embargo, las teorías atómicas desarrolladas en aquel tiempo (véase cap. 19-22) fueron de gran valor a la ciencia, a pesar de que no podían basarse en definiciones estrictamente operacionales.

12.6 Magnitudes primarias y secundarias

Si las raíces de la ciencia, como empresa establecida, son los conceptos con sentido operacional, existirá un gran número de experiencias que habrán de ser despreciadas por ella. En cierto sentido podría compararse el científico a un hombre que está mirando al cielo nocturno con un poderoso telescopio y así es capaz de examinar una pequeña región con gran detalle, sacrificando la posibilidad de observarlo en conjunto de una ojeada. El examinar el número de estrellas, su brillo relativo y su semejanza no nos impide contemplar los cielos por el puro placer del grandioso espectáculo que impresiona al observador casual*.

La comparación es válida. Fue Galileo quien estableció la distinción entre las experiencias y conceptos que deben servir de piedras fundamentales de la ciencia, y aquellos otros que, teniendo un significado más *subjetivo*, debían considerarse, desde el punto de vista de la ciencia, como origen de ilusiones y debates. Galileo les llamó, respectivamente, *magnitudes primarias y secundarias*. Las magnitudes primarias eran observables directos que podían simbolizarse y medirse matemáticamente, como la posición y el movimiento, los mismos elementos que en su tiempo tenían, para usar una frase moderna, una significación operacional simple. Las magnitudes consideradas como secundarias no eran susceptibles de medida en aquel tiempo y tenían un aspecto ampliamente cualitativo. Esta distinción fue ampliamente aceptada tanto por los seguidores de Galileo como por el propio Newton, y todavía es válida en las ciencias físicas. Podríamos decir que la decisión de Galileo reducía el campo de experiencias *elegibles* a una pequeña fracción de la experiencia total del científico, precisamente a la fracción que podía cuantificar y por tanto compartir sin ambigüedad con sus compañeros. Las ideas de la Ciencia parecen tan estilizadas e irreales precisamente porque exigimos de ellas que nos ayuden a describir aquellas características de la experiencia que son de menor interés desde el punto de vista del sentido común —medida, operaciones matemáticas, predicción numérica y clara comunicabilidad— aun cuando no permitan describir exactamente los usos más sobresalientes de las expresiones cotidianas, cuales son nuestros sentimientos, reacciones y otras implicaciones personales.

Los desarrollos recientes en las ramas de la psicología y las ciencias sociales son reminiscencias de aquella primera investigación hacia la cuantificación en física y química. A través de toda Europa, hombres de principios del siglo XVII decían que las ideas cualitativas heredadas de los antiguos abrirían el camino a una nueva forma cuantitativa de describir la Naturaleza. Un ejemplo adecuado es el Aforismo

* La analogía es sugestiva en otro aspecto: La perspectiva de perfeccionamientos sucesivos e inevitables de su telescopio recuerda al investigador que sus descubrimientos son siempre tentativas, mientras que el observador sin medios (no científico) puede, fácilmente, persuadirse a sí mismo de que sus observaciones son definitivas y que puede obtener verdades, asimismo, definitivas.

XCVIII del *Novum Organum* de Francis Bacon, en 1620, donde encontramos esta queja respecto al pensamiento de la época:

«Ahora, en base a la experiencia —pues a la experiencia debemos llegar—, tenemos pocas o muy débiles pruebas; ninguna investigación se ha realizado para recoger un lote de observaciones particulares suficientes en número, en clase, o en certidumbre para informar la comprensión, o de algún modo adecuar... No hay nada debidamente investigado, nada comprobado, nada contado, pesado o medido en la historia natural; y lo que en la observación está suelto y vago, es en la información decepcionante y traicionero.»

12.7 Leyes matemáticas y abstracción

La insistencia en el aspecto cuantitativo de los conceptos puede parecer molesto hasta que reconozcamos que el trabajo del científico físico está basado sobre una creencia tan antigua como desconcertante, y es que los fenómenos de la Naturaleza que observamos, pueden describirse a partir de leyes matemáticas y quedarán *explicados* cuando encontremos las expresiones matemáticas que relacionan las observaciones. Por ejemplo, poco puede añadirse respecto a los cuerpos que caen libremente en el vacío, una vez se ha determinado que se mueven según la ley $s = v_0 t + \frac{1}{2} g t^2$.

Galileo se expresaba de este modo:

«La filosofía (nosotros ahora diríamos ciencia) está escrita en este gran libro que siempre tenemos ante los ojos —quiero decir, el Universo—, pero no podemos comprenderlo si no aprendemos su lenguaje y el significado de los símbolos en que está escrito. Su lenguaje es el de las matemáticas, y sus símbolos, triángulos, círculos y otras figuras geométricas (ahora añadiríamos otros símbolos matemáticos) sin cuya ayuda es imposible comprender ni una sola palabra, y en vano intentaríamos atravesar este oscuro laberinto».*

Para Galileo, como para alguno de sus contemporáneos (por ejemplo Kepler, e, incluso, Harvey) y para los físicos modernos, los métodos matemáticos proporcionan la técnica por *excelencia* para reducir al orden y comprender la Naturaleza. La lógica, que para los escolásticos fue el arma principal de investigación, es ahora la encargada de establecer la consistencia del esquema de demostraciones matemáticas, hipótesis y observaciones. Mientras Galileo y Kepler se sentían impelidos a

* *Discoveries and Opinions of Galileo*, traducido por S. Drake, págs. 237-238.

manifestar en alta voz y a menudo esta creencia, hoy en día, dada la utilidad de este punto de vista, ha llegado a ser una actitud fundamental y común entre los físicos.

Al decir que las leyes son relaciones matemáticas entre observables, significamos —por supuesto— que las descripciones generales de la física suelen enunciarse en la forma «la variable X está relacionada con las variables Y , Z , etc., por tales y cuales funciones matemáticas». (Consideremos, de nuevo, por ejemplo la ecuación de la caída libre o la ley de la gravitación de Newton.) Algunas leyes establecen que $(X/Y) + Z$ (o alguna otra combinación de las variables) tienen siempre un cierto valor numérico o tienden a alcanzar un valor máximo o mínimo bajo determinadas condiciones. Otro ejemplo, sin embargo, es el principio de superposición, que como se recordará, nos dice que las dos variables v_x y v_y en el movimiento de un proyectil no son interdependientes. Ante todo existe el tipo de ley más ávidamente buscado que nos dice: «esta función de tales variables, bajo ciertas condiciones permanece siempre *constante*». De esta clase es el postulado de Galileo sobre la constancia de la aceleración de la caída libre de los cuerpos, ya que podría expresarse diciendo que s/t^2 es constante si el cuerpo que cae parte del reposo. La tercera ley de Kepler es un ejemplo obvio. Otros muchos ejemplos tenemos en principios como el de conservación de la masa, de la cantidad de movimiento, de la energía, del «calórico», etc. El alto aprecio en que se tienen los postulados de esta clase, se debe a que combinan las características más sobresalientes de la ciencia con su más honda preocupación: la formulación matemática de conceptos (s , t , etc.) que ayudan al descubrimiento de esquemas permanentes en el caos de la experiencia.

La formulación matemática de las leyes físicas tiene un efecto incidental e inicialmente desconcertante. A menos que estemos avisados para considerar que una ley es la relación entre variables, podemos estimar que es una relación estricta entre *causa y efecto*. Sin embargo, una ley de tipo $X = YZ$ podríamos escribirla igualmente $Y = X/Z$ o $Z = X/Y$ y no habría modo de decir si X , Y o Z es la causa o el efecto. En consecuencia, es de mucha mayor utilidad pensar en una *interacción* que en un causa-efecto y buscar «con qué factores» está relacionado X , en lugar de decir «cuál es la causa de X ». Por ejemplo, la ley de Boyle establece que para una determinada masa de gas a una temperatura constante la presión absoluta P y el volumen V del gas están relacionados por la ecuación $PV = \text{constante}$, es decir, P es proporcional a $1/V$. Aquí la afirmación de que la presión y el volumen son inversamente proporcionales se cumple mejor, más brevemente y con menos ambigüedad que la descripción equivalente de que los cambios de presión *causan* contracciones y expansiones, o que los cambios de volumen *causan* compresiones o enrarecimientos.

El simple hecho de que las ideas formuladas matemáticamente pueden expresarse de modo simbólico por ecuaciones, constituye una gran ayuda para una rápida comprensión y manejo de los conceptos. Consideremos la simplificación que supone escribir una ecuación como $s = v_0 t + \frac{1}{2} g t^2$, en lugar de expresarla en forma

retórica. Observemos cómo se elimina cualquier otro significado que puedan tener las palabras, qué fácil resulta comunicar razonamientos y resultados de manera clara a los discípulos; y cómo dichas ecuaciones invitan a sacar nuevas conclusiones referentes a la relación entre observables. Existe en esto un buen paralelismo en el campo de la Química, que avanzó de un modo considerable a comienzos del siglo XIX por el simple hecho de expresar las reacciones por medio de fórmulas químicas.

Aún se siguen otras consecuencias de la decisión de los científicos de restringir y dirigir su atención a los fenómenos mensurables y a las relaciones matemáticas entre ellos. Si lo más importante de una esfera que baja rodando por un plano inclinado no es su composición, ni sus detalles de construcción, color, utilidad para el deporte, sino que lo que, realmente, importa al investigador es la relación entre s y t^2 , entonces la esfera deja de ser un ente individual (igualmente podría servir una hogaza de pan o una botella redonda de vino). Al fin y al cabo, la esfera real parece totalmente olvidada y, en su lugar, se habla de una «masa puntual», idealización abstraída del experimento. En este sentido, las leyes de la ciencia y el experimento controlado no se refieren a «cuerpos reales», sino a abstracciones que se mueven en un espacio hipotético con propiedades propias, en un mundo que podemos manejar a voluntad, prescindiendo de toda resistencia del aire, considerando el plano inclinado perfectamente liso y recto, en el que podemos modificar algún aspecto, por ejemplo el ángulo de inclinación, dejando los otros parámetros invariables. Este mundo, interpretado en su propio lenguaje esotérico, lleno de simplificaciones y exageraciones, es, en algunos de sus aspectos más importantes, análogo al de los modernos pintores, poetas o compositores.

Así, todas las características de la ciencia conspiran para transformar los pesos reales de la bella Pisa en partículas indistinguibles que se mueven en un espacio euclídeo. Mucho se perdería en esta trasposición si fuese éste el fin del proceso científico y, aunque lo es en gran parte, una primera parte proporciona la satisfacción de reducir, ordenar y, por tanto, comenzar a comprender las experiencias de los sentidos. Pero todavía hay más: en ningún momento se ha roto completamente el contacto con los hechos; las mismas reglas por las que se hace la transición de un mundo a otro, son aplicables para volver del mundo de la abstracción al de los fenómenos reales. Esto viene garantizado por el carácter operacional de los conceptos que se emplean en el mundo abstracto. Por ejemplo, al deducir la expresión $v^2 = v_0^2 + 2as$ de las otras ecuaciones del movimiento, podríamos no tener la impresión de estar en contacto con el mundo real de los cuerpos en movimiento, si bien al final el resultado (dicha ecuación) podría referirse también a movimientos reales. De hecho —y esto es lo más importante— *el mundo matemático en el cual podrían tener lugar los cálculos sólo está justificado y tenido en cuenta por la Física por el hecho de dar un conocimiento nuevo del mundo real que nos rodea*. Si hubiese un fallo en esta función, habría que modificar las reglas del mundo abstracto hasta que diesen resultados útiles. Y así sucede que la abstracción de una esfera real a una partícula nos conduce a las leyes del movimiento, aplicables no

sólo a esta esfera, sino a cualquier otra que podamos imaginar y a todos los objetos capaces de rodar y deslizar.

Esto proporciona, por tanto, una gran ventaja, que justifica el sacrificio temporal de la identidad del objeto esférico real. El filósofo Rudolph Carnap ha sugerido a este respecto una clara analogía. Los símbolos y ecuaciones de los físicos guardan la misma relación con el mundo real de los fenómenos, que las notas escritas de una melodía con los sonidos de la misma. Las notas escritas no tienen —por supuesto— sonido por sí mismas, ni los sonidos se han perdido enteramente en ellas. En todo momento podrían transformarse los símbolos del papel en melodía audible, con tal que se conozca el convenio que relaciona notas y sonidos. De modo semejante, podemos considerar la ciencia como un arco que reposa sobre dos pilares: la observación y la experiencia, que soportan entre ellos la conceptualización y la abstracción. La seguridad del arco depende de la firmeza de los pilares.

Siguiendo estas líneas, podemos desarrollar una visión global de la Ciencia. Las palabras de Francis Bacon nos proporcionan una primera idea:

«Sin embargo, mi curso y método, como yo he establecido claramente con frecuencia y desearía hacerlo de nuevo, es éste: no extraer trabajos de trabajos o experimentos de experimentos, de un modo empírico, sino a partir de trabajos y experimentos extraer causas y axiomas y, de nuevo, a partir de las causas y axiomas, nuevos trabajos y experimentos, como un intérprete legítimo de la Naturaleza.»

Un punto de vista moderno sobre estas líneas está contenido en la definición que James B. Conant hace de la ciencia: «La ciencia es una serie entrelazada de conceptos y esquemas conceptuales que se han desarrollado como resultado de la experimentación y la observación, y son útiles para posteriores experimentaciones y observaciones».*

12.8 Explicación

Debemos ahora volver a responder a una voz que ha estado preguntando un punto fundamental: la afirmación de que un científico físico encuentra *explicaciones* formulando relaciones matemáticas entre observables. Nuestro crítico podría decir: «Veo que este convenio es útil en el sentido de que permite formar las leyes de, por ejemplo, el movimiento de proyectiles con las cuales poder dirigir misiles con precisión. Sin embargo, no estoy de acuerdo en que todo quede *explicado* con esto. Es verdad que cuando Galileo estableció que la trayectoria del proyectil coincide con la curva geométrica llamada parábola, dio una descripción simple y ele-

* J. B. Conant, *Science and Common Sense*, New Haven: Yale University Press, 1951, página 25.

gante de la misma, aplicable a un gran número de casos y útil para predecir todo tipo de trayectorias. Pero yo quisiera conocer *la razón última* por la cual los proyectiles se mueven según sus trayectorias parabólicas y permaneceré insatisfecho con cualquier explicación hasta obtener una imagen o una necesidad intuitiva del movimiento en arco de los proyectiles». Ahora es muy sencillo explicar por qué las trayectorias son parabólicas, pero sólo en función de las leyes de la fuerza gravitatoria que actúa sobre objetos masivos, leyes que son, en sí mismas, relaciones matemáticas. Nuestro interrogador, por otra parte, no exige más. Quedaría satisfecho con la explicación que se daba corrientemente antes de finales del siglo XVI o con alguna otra, por ejemplo, suponiendo que el proyectil se moviese de un modo imaginario por tubos curvados invisibles o siguiendo trayectorias marcadas en el éter. Si nuestro interrogador continuase adelante, llegaría a la siguiente conclusión: las únicas herramientas para la comprensión de los fenómenos físicos, su vocabulario de la imaginación, son imágenes, alusiones y analogías que contienen los sucesos mecánicos primitivos de la vida cotidiana. Le contestaríamos que sus ideas están influidas por sensaciones musculares corrientes. Por ejemplo, el campo gravitatorio o el efecto eléctrico de un cuerpo sobre otro a través del vacío no puede comprenderlo, a no ser que se imagine entre estos cuerpos algún medio invisible que, de un modo u otro, transmita cualquier impulso mecánico real o una atracción de uno sobre otro.

Esta característica de la mente humana, este ansia por lo concreto, caracteriza no solamente la constante preocupación por los modelos mecánicos dentro de la ciencia, sino también el tipo más primitivo de explicación. En la antigua India, se representaba la Tierra mantenida en el espacio sobre los lomos de gigantes elefantes, y los primitivos egipcios creían que Osiris pesaba las almas humanas en una balanza sostenida manualmente. Sería sorprendente que las imágenes de la religión, la poesía e incluso de la ciencia primitiva, no hubiesen buscado sus materiales originales en las experiencias ordinarias y directas de cada día. Además, algunas de las contribuciones de los grandes científicos se debieron a hombres cuya intuición física estaba dirigida de esta manera. Pero conforme la Física moderna se ha enfrentado con problemas más y más desligados del marco de la experiencia común, ha sido necesario aumentar el equipo de herramientas conceptuales con las cuales captar y comprender los fenómenos. Nuestro estudio del átomo nuclear servirá, más adelante, como ejemplo particularmente característico de la necesidad de prescindir de modos ingenuos de representación que se apoyan en la intuición y en explicaciones visualizables: las primeras manifestaciones de esta ruptura pueden encontrarse en la insistencia de Galileo de que el movimiento debía explicarse en términos de una formulación matemática abstraída de la experiencia y en la negativa de Newton a apuntalar la ley de la gravitación universal mediante la hipótesis mecánica de un éter, diciendo: «Para nosotros es suficiente saber que la gravedad existe realmente y actúa según las leyes que hemos explicado, y sirve de un modo correc-

to para dar cuenta de todos los movimientos de los cuerpos celestes y de nuestro mar».

Para referirnos a un ejemplo más concreto de la física moderna, consideremos el fenómeno de la desintegración radiactiva de un isótopo determinado del radio. La experiencia enseña que una muestra pura determinada que contiene inicialmente un número N_0 de átomos de este tipo, se transforma, poco a poco,

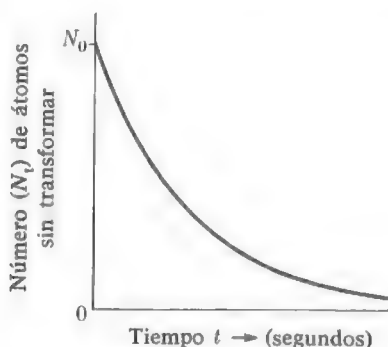


Fig. 12.1 Desintegración de un elemento radiactivo.

en sustancias químicas diferentes, emitiendo cada átomo de radio una partícula alfa y convirtiéndose, primeramente, en un átomo del elemento radón. Después de un tiempo t , solamente existen, sin transformarse, un número N_t de los primitivos N_0 átomos de radio, como se ha representado en la gráfica de la figura 12.1. De nuevo es un hecho experimental, que originalmente fue muy difícil de establecer y costó un alto precio, que esta gráfica es, para todas las sustancias radiactivas, una curva exponencial, es decir, que la ecuación correspondiente a esta conducta es de la forma

$$N_t = N_0 e^{-0,693t/T}, \quad (12.1)$$

en donde N_t , N_0 y t ya se han definido anteriormente, $e = 2,718$, y T es una constante cuyo valor depende sólo de la sustancia y nos da una medida de la rapidez con que se desintegra.

Así pues, dado que esta ecuación nos describe y resume los hechos netamente, la llamaremos *ley de la desintegración radiactiva*. Aunque esta ley empírica matemática es indispensable y luminosa, no explica la razón íntima de por qué los átomos de los elementos radiactivos se transforman en los de otros elementos. Éste es otro problema aún sin resolver. Sin embargo, la solución vendrá, inevitablemente, por algún postulado expresado de un modo matemático tal como alguna fórmula que describa las fluctuaciones de las fuerzas de enlace dentro de los núcleos atómi-

cos, y así, en último término, los fenómenos descritos por la ecuación (12.1) aún vendrán explicados por medio de fórmulas matemáticas.

Quizás no resulte demasiado frívolo mantener que «explicar» significa reducir a lo familiar, establecer una relación entre lo que se ha de explicar y las concepciones previas (correctas o incorrectas) incuestionables. Los conceptos de los escolásticos eran grandiosos y arrebatadores (lugar natural, causas finales, fenómenos celestes en función de los terrestres, etc.) y reflejaban la imperiosa universalidad, quizá demasiado ambiciosa, de sus problemas y explicaciones. El científico moderno se limita a preconcepciones más limitadas y concretas; por ejemplo, que la Naturaleza puede describirse a partir de simples modelos o esquemas matemáticos. Para él, la ley que expresa que la suma matemática de todas las energías de un sistema puede considerarse que es una constante perpetua, es la explicación satisfactoria de una serie de fenómenos, mientras que para muchos no científicos la misma ley sería considerada como otro misterio inexplicado. Para quedar realmente satisfecho con la formulación y respuesta dada por las matemáticas, se requiere entrenamiento y repetidos éxitos personales en la resolución de problemas físicos, del mismo modo que se requiere un programa valiente de orientación para estar totalmente satisfecho con las recompensas y las reglas de comportamiento en cualquier profesión, o para lo anterior, en nuestra propia civilización.

Después de haber examinado la naturaleza de los conceptos en la Física, estamos preparados para considerar cómo se integran estos conceptos en el avance de la ciencia.

Problema 12.1 Cuando Galileo y otros defensores del sistema heliocéntrico en el siglo XVII aseguraban que es, realmente, la Tierra la que se mueve en lugar del Sol y las estrellas, ¿violaron la regla de que los conceptos físicos deben tener definiciones operacionales?

(La bibliografía de este capítulo se encontrará al final del capítulo 14.)

23 OCT 1966

Capítulo 13

Sobre la dualidad y crecimiento de la ciencia

13.1 La libre licencia de la creación

Nuestro estudio de la naturaleza de los conceptos físicos, ha puesto de manifiesto que la principal razón para su formulación es utilizarlos en relación con leyes enunciadas matemáticamente. Podríamos aún ir más lejos y pedir de los científicos prácticos que tratasen solamente con ideas que correspondan a conceptos estrictamente mensurables, que sólo formulen conceptos que puedan reducirse a los menos ambiguos de todos los datos: números y medidas. La historia de la ciencia proporciona numerosos ejemplos de los grandes avances que han seguido a la formulación de conceptos estrictamente cuantitativos, ya se trate de medidas del tiempo que tardaba en descender una esfera por un plano inclinado, de estadísticas de población, de los pesos de los compuestos en una reacción química o, en el caso de los experimentos de Pavlov, la velocidad de secreción de la saliva en animales experimentales, etc. El científico del siglo XIX, Lord Kelvin, comentaba esta tendencia en su famosa manifestación:

«Digo a menudo, que cuando se puede medir aquello de lo que se habla y expresarlo en números, es cuando se conoce algo de ello; pero cuando no se puede medir, cuando no puede expresarse en números, el conocimiento es poco satisfactorio; puede ser el comienzo del conocimiento, pero apenas se ha avanzado, con estos pensamientos, para llegar al estado de *Ciencia*, cualquiera que sea la materia de que se trate...»*

* «Electrical Units of Measurement» (1883), *Popular Lectures and Address*, vol I, segunda edición (London: Macmillan, 1891,) págs. 80-81.

Aunque esta tendencia es útil dentro de sus límites, existe un aspecto completamente diferente de los conceptos científicos; ciertamente, es probable que la ciencia se paralizase si cada científico tuviera que evitar cualquier cosa distinta de los conceptos estrictamente cuantitativos. Una manifestación como la de Kelvin (que hoy en día parece tener gran influencia sobre algunos pensadores de estudios sociales) no justifica la complejidad ni la fertilidad de la mente humana ni responde a las necesidades de la ciencia física contemporánea, ni a los científicos tampoco. Aparte, totalmente, de la imposibilidad práctica de exigir a la mente que identifique en todo momento conceptos tales como el de *electrón* sólo con aspectos mensurables del mismo, existen dos grandes objeciones: en primer lugar, que esta posición da una visión equivocada del modo en que los científicos, como individuos, realizan su trabajo; y, en segundo lugar, de cómo la ciencia, en cuanto sistema, se va construyendo con la contribución de los individuos.

Vamos a examinar el primero de estos importantes puntos con un poco más de detalle. Sería equivocado por la lectura de las páginas anteriores, sacar la conclusión de que los científicos prácticos, en su trabajo de creación, deben estar comprobando continuamente el significado estricto de sus conceptos y problemas. Como regla general, un investigador debe desentenderse de tales cuestiones metodológicas mientras no surja algún obstáculo serio. El punto de vista operacional, de uso ordinario, es casi instintivo; generalmente suele hacerse consciente y explícito sólo cuando hay algo que no funciona.

Podríamos pensar que es el caso de un acróbata que, indudablemente, no se encuentra agobiado por la constante preocupación de las leyes físicas por las cuales actúa y sobrevive; es muy probable que si se atormentase demasiado por ellas, caería. Muchos de nosotros hemos visto también los resultados deplorables de ciertos artistas, demasiado preocupados por sus medios y métodos de trabajo. El caso es que *mientras un científico lucha con un problema, no debe haber limitaciones conscientes ni a su libertad ni a sus construcciones, a veces audaces*. Según sea la materia, el problema, su preparación y temperamento, puede guiarse, por una secuencia lógica basada en hipótesis más o menos provisionales, por un «sentimiento de las cosas», por probables analogías, por alguna intuición prometedoras, o bien puede seguir un procedimiento juicioso de aproximaciones sucesivas. Lo más frecuente y lo que tiene mayores probabilidades de éxito es un buen planteamiento del experimento; pero algunos científicos no construyen, a menudo, su plan de ataque; en lugar de esto, dejan que su entusiasmo, su impulso, y el puro goce del descubrimiento les sugieran su línea de actuación. En ocasiones, por tanto, el descubrimiento de algún nuevo efecto o técnica viene seguido de un período de prueba de algunas de sus aplicaciones, de un modo que pudiera parecer superficial, casi un juego.

Incluso la orientación filosófica de los científicos está prescrita mucho menos rígidamente de lo que podía suponerse. A grandes rasgos, las opciones que se les presentan se pueden clasificar de la manera siguiente: Tal vez la mayoría de las per-

sonas defenderían la posición de que las experiencias que les llegan a través de sus sentidos están ocasionadas directamente por un mundo exterior y a él corresponden exactamente. Este sería un mundo «real» que existe al margen de nuestras interpretaciones. Este punto de vista se denomina *realismo* y está en oposición a dos sistemas filosóficos principales (entre otros muchos). El primero es el *idealismo* el cual mantiene que nuestras ideas e impresiones son las únicas realidades y que las utilizamos para construir conceptos tales como el de silla, metro, casa, etc.; y el segundo es el *positivismo*, que no admite, en absoluto, tales «realidades», y no considera nada como cierto o significativo más allá de los datos sensibles (por ejemplo, las lecturas de un indicador) y los conceptos que puedan referirse a datos sensibles. Podría suponerse que puesto que la parte establecida de la ciencia física debería ser, de un modo ideal, susceptible de una directa comprobación en términos de medidas, todos los científicos deberían, asimismo, ser positivistas. Sin embargo, aunque es verdad que la mayoría de los científicos están de acuerdo con las consecuencias prácticas del positivismo en su propio trabajo, no participan activamente en esta controversia filosófica. Einstein dice que un científico práctico, desde el punto de vista de la Filosofía, puede parecer a un profano

«...un tipo de oportunista sin escrúpulos: aparece como *realista*, en cuanto busca describir el mundo independientemente de su acto de percepción; como *idealista*, en cuanto considera los conceptos y teorías como libres invenciones del espíritu humano (y que no se derivan, lógicamente, de los datos empíricos); como *positivista*, en cuanto considera sus conceptos y teorías justificados solamente hasta el punto en que proporcionan una representación lógica de relaciones entre experiencias sensoriales. Incluso puede parecer *platónico* o *pitagórico* porque considera la simplicidad lógica como el instrumento indispensable y efectivo de su investigación.»*

13.2 Ciencia «privada» y ciencia «pública»

Los importantes problemas de la creación científica no suelen presentarse con rutas obvias hacia sus soluciones y, por tanto, difieren en muchos aspectos esenciales de los problemas científicos que un estudiante puede encontrar en su trabajo o en sus ejercicios de laboratorio. Sobre todo, rara vez se sabe desde un principio si se podrá resolver el problema con las herramientas o conceptos iniciales, ni dónde pueden surgir nuevas complicaciones; toda la Ciencia tiene una unidad y a diferencia de lo que sucede con los ejercicios usuales de los alumnos, el trabajo de un especialista en Ciencia moderna también puede comprender una gran variedad

* De *Albert Einstein: Philosopher-Scientist* (editado por P. A. Schilpp), pág. 684, Evanston, Illinois: Library of Living Philosophers, 1949.

de campos concretos diferentes, a veces de manera insospechada. Una investigación de la estructura física de los líquidos, por ejemplo, tiene que recurrir a materias tan diversas como son la termodinámica, química física, cristalografía, acústica, electrónica, y hasta una cierta metalurgia práctica. Además los métodos y resultados de un campo de la Física sugieren, frecuentemente, procedimientos análogos para otros. En consecuencia, el científico debe estar siempre alerta al más leve indicio de nuevas dificultades y de su solución. Va marchando por su problema, al modo de un explorador a través de la jungla, siempre atento a todas las señales, con todos los sentidos de su ser. Verdaderamente, algunos de los científicos teóricos de mayor poder creador han manifestado que, durante las primeras etapas de su trabajo, ni siquiera *pensaban* en términos de símbolos convencionales comunicables ni de palabras.

Solamente cuando este estado «privado» ha sido superado y la contribución del individuo se ha formalizado para ser absorbida en la ciencia «pública» (a veces llamada ciencia de libro), empieza a ser realmente importante que cada paso y cada concepto se establezcan con pleno significado y claridad. Estos dos aspectos de la ciencia, que tendremos ocasión de llamar *ciencia-en-formación*, S_1 , y *ciencia-como-institución*, S_2 , deben estar claramente diferenciados. El físico nuclear americano H. D. Smyth, ha caracterizado así esta distinción: «Existe una paradoja en el método científico. El investigador debe pensar y trabajar, a menudo, como un artista, pero ha de hablar como un tenedor de libros, en términos de hechos, imágenes y secuencias lógicas de pensamientos». Por esta razón, no debe tenerse demasiado en cuenta, ni en su aspecto cronológico ni en sus métodos, la apariencia de los artículos científicos y tratados, incluyendo los de Galileo. Esto forma parte del juego de la ciencia, simplemente porque proporciona los resultados retrospectivamente, tan fácilmente derivados de los fundamentos que, en frase de John Milton, «...tan fácil parecía una vez encontrado, ¡lo que antes de descubrirse podía considerarse imposible!». Un investigador puede ocultar trabajos arduos y tortuosos detrás de un breve y elegante párrafo, del mismo modo que un escultor retira sus instrumentos, sus estudios preliminares y engorroso andamiaje, antes de descubrir su obra.

Incluso en la ciencia pública se encuentra muy difundido el uso de ciertos conceptos que no han adquirido un significado operacional preciso. Esta situación, a veces, da lugar a debates entre los filósofos y los científicos relacionados con la metodología. Desde el siglo XVII al XIX ha habido tres conceptos en controversia en las ciencias físicas: el *átomo*, el *éter*, y la *fuerza*. Como mencionábamos al final de la sección 12.5, algunos de los más fuertes ataques a la teoría atómica se produjeron al final del siglo XIX cuando la teoría estaba en los umbrales de algunos de sus más espectaculares éxitos. Aunque Ernst Mach y sus colegas positivistas tuvieron buenas razones para ser escépticos acerca de la existencia real de los átomos, una mirada retrospectiva parece indicarnos que sus criterios, incluso el uso tentativo de tales conceptos teóricos, eran innecesariamente estrictos. Al insistir en la ex-

clusión de los átomos de la formulación de las teorías físicas, se privaron ellos mismos de un buen instrumento mental —y el resto de la ciencia de sus posibles contribuciones adicionales— por una adherencia doctrinal a su posición. Incluso el concepto del éter, aunque ahora lo juzgamos superfluo, no fue totalmente inútil en la historia de la ciencia, pues, por ejemplo, ayudó a Maxwell a formular una teoría fructífera de los campos y ondas electromagnéticos. De igual modo, el concepto de fuerza, si bien criticado, frecuentemente, como vago o superfluo, jugó un importante papel en el desarrollo de la física, en algunos casos, precisamente en virtud de su ambigüedad.

Hoy día, la mayoría de los científicos reconocen tácitamente que la actividad creadora no debe estar afectada por tales prejuicios. Se ha dicho muy bien: «Poner límites a la especulación es traicionar al futuro».

13.3 Selección natural de los conceptos físicos

Se va haciendo claro ya, que no hay regla simple que nos conduzca al descubrimiento de nuevas ideas o a la invención de nuevos conceptos, ni a predecir si nuestras contribuciones llegarán a ser útiles y duraderas. Pero la ciencia existe y es una empresa vigorosa y prometedora. La lección que puede sacarse de su historia es que *la ciencia, como estructura, se desarrolla mediante una lucha entre las ideas por su supervivencia* (éste es el proceso maravilloso del trabajo por el cual se va purificando en el transcurso del tiempo el significado de los conceptos, inicialmente confusos). Este proceso permite la absorción en la ciencia-como-institución, S_2 (ciencia pública), de todo lo importante que pueda haberse desarrollado en la ciencia-en-formación, S_1 (ciencia privada), cualesquiera que hayan sido los medios o métodos.

Hemos visto que aquellos conceptos que más han contribuido al crecimiento de la ciencia física, presentan dos características generales. *En primer lugar*, estos conceptos (aceleración, fuerza, energía, valencia, etc.) tienen un núcleo de significado claro y sin ambigüedad o que, al menos, han adquirido una tácita comprensión y significado operacional comunicable, por su continua aplicación en situaciones experimentales. *En segundo lugar*, a mayor abundamiento casi todos los conceptos físicos son cuantitativos, esto es, pueden asociarse a números y medidas y por tanto a operaciones manuales o matemáticas; así podemos hablar de una fuerza de 15 newton, una masa de 10 kg, una temperatura de 100° , una valencia +2, un espacio de 3 dimensiones, un peso atómico de 238,07, un pH igual a 5. Estas afirmaciones son válidas aun para muchos conceptos que, superficialmente, parecen desprovistos de toda significación numérica. Por ejemplo, aunque no podamos decir que un cuerpo tiene 3, 4, ó 5 unidades de *equilibrio*, sin embargo podemos definir este concepto diciendo que un cuerpo está en equilibrio cuando su acelera-

ción es cero. Si bien definimos la «fusión» como el cambio de estado de una sustancia de sólido a líquido, ésta sólo adquiere su significado físico preciso cuando puede describirse por el cambio de los valores numéricos de su viscosidad y dureza. Un físico puede describir el electrón como la cantidad de electricidad más pequeña que existe independientemente, pero al utilizar tal concepto, se está refiriendo a sus aspectos numéricos: su carga eléctrica de $1,6 \times 10^{-19}$ unidades de carga, su masa de $9,1 \times 10^{-31}$ kg, y así sucesivamente; en resumen, «electrón» es un término que resume todo un conjunto completo de magnitudes mensurables.

A las dos características reseñadas de los conceptos, hay que añadir una tercera, que es su *utilidad general*, sin la cual la ciencia degeneraría en un complejo conjunto de datos sin sentido. El caos de la experiencia nos permite formular infinidad de ideas, todas ellas significativas en el sentido anterior. Por ejemplo, podríamos inventar arbitrariamente algún nuevo concepto X a partir de observaciones de la caída libre de los cuerpos, definiéndolo por la ecuación $X = (v - v_0)/s$. A primera vista, X parecería digno de un nombre propio y de una amplia aceptación, como por ejemplo la magnitud $a = (v - v_0)/t$. Pero en la práctica, sucede que X no aparece de un modo prominente en las leyes simples de la Naturaleza; por ejemplo, X no permanece *constante* durante la caída libre. Por esto X , aunque sea un concepto posible y significativo, presenta el fallo de su inutilidad. (Incidentalmente diremos que esta X es la misma magnitud que Galileo sospechaba erróneamente que se mantenía constante en la caída libre.)

Lo que confiere importancia a ciertos conceptos es, por tanto, su aparición en una gran cantidad de descripciones y leyes, en áreas muy alejadas, a menudo, de las de su inicial formulación. El electrón, descubierto en el intento de explicar los fenómenos de descargas en tubos análogos a los que ahora se utilizan para letreros luminosos, tuvo un importante papel en la explicación de las corrientes eléctricas en conductores metálicos y en líquidos, en la fotoelectricidad, en los fenómenos termoiónicos (como en las válvulas de radio y televisión), en la radiactividad, en la emisión de luz por los cuerpos incandescentes, y en otros muchos casos. *He aquí* la única razón y todo el significado de la afirmación de que los científicos «creen en la realidad» de los electrones: que el concepto es de gran necesidad y en tan diferentes aspectos. Einstein decía: «La única justificación de nuestros conceptos es que sirven para representar toda la complejidad de nuestras experiencias».

Al establecer una nueva idea, es quizá muy difícil decir si satisfará este criterio, o sea si sobrevivirá a la prueba de su amplia aplicación y, por tanto, se incorporará a la ciencia. En este sentido, podríamos decir que el trabajo de Galileo habría carecido de significado sin el ulterior crecimiento de la ciencia física. Galileo presentía, pero no podía saber, que sus trabajos sobre Mecánica adquirirían excepcional importancia y que sus métodos y descubrimientos encontrarían (con los trabajos de Kepler y Newton) una significación general que trascendería a lo inmediato. Esto

constituye un poderoso acicate para todo científico: la ciencia del mañana puede necesitar y aun depender de su propio trabajo.

El caso más espectacular de ideas de utilidad general, como hemos visto, es el de los conceptos «fundamentales» de la física (p.e., longitud, masa, tiempo). Son muy pocos, aun cuando constituyen la piedra angular sobre la que se construyen o derivan los demás conceptos (p.e., velocidad, que es la razón de una longitud a un intervalo de tiempo). No cesamos de admirarnos de la posibilidad de reducción que existe en la Naturaleza (y en ella debemos buscar la base o el resultado de la idea directriz del científico relativa a la simplicidad de la Naturaleza). Encontraremos otros importantes conceptos «derivados» (por ejemplo, el potencial eléctrico) que nos guiarán como fuertes sogas a través de la maraña de fenómenos, proporcionándonos apoyo y dirección en las circunstancias más variadas. Tales conceptos, definidos inicialmente para un problema limitado, se han extendido y adquirido importancia con el correr de los años y en su evolución han cambiado o ampliado, frecuentemente, su significado al ampliarse los campos de aplicación; por ejemplo, las ideas de *fuerza*, *energía* y *elemento*. Esta posibilidad de cambio nos hace ver que los conceptos de la ciencia no son absolutos, y su significado depende de lo que el científico pueda hacer con ellos.

Podemos intentar ahora un resumen preliminar de los puntos principales que hemos considerado hasta ahora. Vemos que el científico físico es un buscador de armonías y constancias en la jungla de la experiencia. Tiende al conocimiento y predicción, principalmente por el descubrimiento de leyes matemáticas. Sin embargo, estas contribuciones individuales constituyen solamente una parte de la cuestión, pues el avance de la ciencia se realiza en dos aspectos: Uno de ellos, al que llamaremos ciencia privada o ciencia-en-formación S_1 comprende los elementos especulativos y creativos, el continuo flujo de las contribuciones individuales, realizadas de un modo peculiar propio, sin un examen consciente de sus métodos, con sus propias motivaciones y generalmente desinteresadas, de los grandes problemas filosóficos de la ciencia; y el otro aspecto, S_2 , es la ciencia como compromiso evolutivo, la ciencia como red en crecimiento sintetizada a partir de estas contribuciones individuales aceptando o adoptando aquellas ideas —o incluso aquellas partes de ideas— que resultan útiles y fructíferas a lo largo de generaciones de científicos. Las frías tablas de constantes físicas y químicas, las desnudas ecuaciones de los textos, constituyen el duro núcleo de S_2 , el residuo destilado de triunfos individuales a profundizar en S_1 , ampliamente comprobados por el múltiple testimonio de la experiencia general.

Esta dualidad de la ciencia es una de sus principales fuentes de fortaleza. Para aclarar esto con ejemplos concretos, vamos a considerar brevemente, dos problemas: el de la motivación, y el de la interpretación de los hechos. Esto, incidentalmente, nos preparará el terreno para las tareas más pesadas que siguen: el examen de los detalles del mecanismo por el cual S_2 surge de S_1 y la explicación del papel

vital que juega la existencia de elementos contradictorios en la ciencia. Una vez reallizada la adecuada distinción entre los distintos niveles de significado del término «ciencia», se habrá eliminado una de las fuentes principales de confusión en los estudios metodológicos.

13.4 Motivación

Cuando Whitehead decía: «La ciencia no puede encontrar ninguna satisfacción en la Naturaleza; la ciencia no puede encontrar ningún objetivo en la Naturaleza; la ciencia no puede encontrar ningún poder de creación en la Naturaleza»*, se refería al sentimiento ambivalente de la época actual hacia la ciencia (un simultáneo temor y reverencia hacia esta empresa reputada como carente de emoción, aunque profundamente incitante). Quizás podamos ver ahora que esta opinión de la ciencia se refiere solamente a uno de sus dos aspectos, a su aspecto estable y no al transitorio, a S_2 y no a S_1 . La ciencia moderna, como estructura, no puede decir nada respecto a propósitos e intenciones, pero el científico puede estar fascinado en cierto grado por preocupaciones no racionales.

Unas pocas citas ilustrarán este punto, pues en otros tiempos, cuando los científicos eran más libres de sus humanos secretos, confesaban, a menudo, sus convicciones místicas o religiosas. Galileo, hombre piadoso, consideraba las leyes de la Naturaleza como una prueba de la Divinidad igual a la de las Escrituras (véase sec. 5.4), y ya desde el tiempo de los pitagóricos esta fe, reflejada en la frase «el mundo es divino a causa de su armonía», ha sido un tema motivador. Casi sin excepción, los científicos, como grupo, han manifestado en todas las épocas, incluyendo la nuestra, las mismas convicciones religiosas o su falta de ellas, como han hecho otros grupos contemporáneos de hombres educados; en todo caso, su posición se ha desplazado, frecuentemente, hacia tales cuestiones más que otros grupos igualmente bien informados. Hasta hace casi cien años, el científico típico afirmaba abiertamente que el mundo físico no podía comprenderse sin recurrir a hipótesis teístas fundamentales. En este aspecto, también, los hombres del siglo XVII eran los formuladores de los conceptos fundamentales y, aunque los detalles de los argumentos hayan cambiado considerablemente, nunca han sido expresados en su forma general de modo más bello y sincero que en la descripción de Newton de su propia actividad científica como preludio de su conocimiento religioso, específicamente, de la «primera causa», la Divinidad:

«...el principal objeto de la filosofía natural es argüir a partir de los fenómenos, sin hipótesis preconcebidas, y deducir las causas de los efectos, hasta llegar a

* A. N. Whitehead, *Modes of Thought*, New York: Macmillan, 1938, conferencia VIII.

la misma Causa Primera, que ciertamente no es mecánica; y esto no solamente para desplegar el Mecanismo del Mundo, sino para resolver, principalmente, cuestiones análogas a estas: ¿Qué hay en los lugares casi vacíos de materia, y de dónde viene el que el Sol y los planetas graviten entre sí, sin materia densa entre ellos? ¿De dónde que la Naturaleza no haga nada en vano; y de dónde surge el orden y belleza que vemos en el mundo? ¿Cuál es el fin de los cometas y por qué los planetas se mueven todos del mismo modo según órbitas concéntricas, en tanto que los cometas lo hacen según una gran variedad de órbitas de gran excentricidad; y qué impide a las estrellas fijas de caer unas sobre otras? ¿De dónde viene el que los cuerpos de los animales estén formados con tal arte y con tal fin sus distintas partes? ¿Fue formado el ojo sin habilidad para la óptica y el oído sin conocimiento del sonido? ¿Cómo provienen los movimientos del cuerpo de la voluntad y de dónde les viene el instinto a los animales? ¿No es la sensibilidad aquel lugar en que se encuentra la sustancia sensitiva en los animales y al cual se transmiten las especies sensibles de las cosas por medio de los nervios y el cerebro para ser allí percibidas por su presencia inmediata ante la sustancia? Y estando todas estas cosas tan recatemente establecidas, ¿no aparece claro de los fenómenos, la existencia de un Ser incorpóreo, vivo, inteligente, omnipresente, que, en el espacio infinito, como si allí estuviera su sensibilidad, ve lo íntimo de las cosas, las percibe y comprende totalmente por su inmediata presencia ante Él? ¿Cómo se ven y contemplan, por lo que en nosotros percibe y piensa, las imágenes transmitidas solamente a través de los órganos del sentido a nuestra pequeña sensibilidad? Y aun cuando todo paso verdadero dado en esta filosofía no nos lleve inmediatamente al Conocimiento de la primera Causa, nos aproxima a ella y por ello hay que tenerlo muy en cuenta». (*Opticks*).

En una carta escrita en 1692 a un amigo, Newton decía de los motivos que tuvo para escribir los *Principia*:

«Cuando escribí mi tratado (*Principia*) acerca de nuestro sistema (solar), tuve la intención de que los principios expuestos llevaran a los hombres a la consideración de la fe en una Divinidad; y nada me ha alegrado más que saberlos útiles para mi propósito.»*

Consideremos otra idea persistente «no racional» del pensamiento científico: la preocupación por los números enteros, de la cual ya hemos visto un ejemplo en la ley de Bode y aún veremos otros. Galileo, al comienzo del estudio histórico de las leyes de la caída libre, en *Dos nuevas ciencias*, decía: «...por lo que yo sé, nadie había establecido hasta ahora que las distancias recorridas por un cuerpo que cae desde el reposo, durante iguales intervalos de tiempo, están en la misma razón que

* Carta a Richard Bentley, reimpressa en *Newton's Philosophy of Nature*, pág. 46.

los números impares comenzando por la unidad». En todo el desarrollo de la física y química hasta nuestros días, encontramos este sentimiento de satisfacción con relaciones numéricas tan sencillas. Los físicos nucleares actuales han encontrado que algunas de las características de los núcleos pueden explicarse según una teoría en la que intervienen unos pocos números recurrentes, llamados, generalmente, «números mágicos» con un poco de buen humor. Los ejemplos podrían multiplicarse indefinidamente, pero, quizás, el extracto siguiente sea suficientemente representativo: El físico suizo, Wolfgang Pauli, al aceptar el premio Nobel de Física en 1945, al hablar del trabajo de su gran maestro Arnold Sommerfeld buscando una explicación de las longitudes de onda particulares de los gases incandescentes, decía:

«Sin embargo, Sommerfeld era partidario... de una interpretación directa, lo más independiente posible de modelos, de las leyes de los espectros mediante números enteros, siguiendo el ejemplo de Kepler en su investigación del sistema planetario guiado por un sentimiento interior de la armonía... La serie de los números enteros 2, 8, 18, 32... que nos dan la magnitud de los períodos de los sistemas naturales de elementos químicos fue discutida celosamente en Munich, incluyendo la observación del físico sueco Rydberg de que estos números seguían la forma simple $2n^2$, siendo n un número entero. Sommerfeld trató, especialmente, de relacionar el número 8 con el número de vértices de un cubo.»

Presentadas así las motivaciones de muchos científicos, al igual que el mismo proceso del descubrimiento, quizá parezcan sorprendentemente «acientíficas». Pero, precisamente por contener elementos irracionales, la marcha hacia el descubrimiento es poderosa aun bajo las condiciones más adversas. ¿Cómo podemos explicar que muchos trabajos importantes se hayan hecho venciendo las dificultades que suponen una pobreza extrema y una delicada salud y, a veces, la amenaza de una muerte inminente? ¿O que la mayoría de científicos, hasta nuestros días, hayan rechazado mejores niveles de vida en posiciones *no creativas* y en vez de ello hayan seguido sin restricciones el trabajo que eligieron, aun cuando las recompensas materiales hayan sido relativamente escasas? Nos vemos obligados a reconocer la siguiente relación simbiótica: El progreso de la Ciencia ha dependido, muchas veces, de la tenacidad, casi irrazonable de sus consagrados y, por otra parte, la actividad científica proporciona una alegría única y una profunda satisfacción. En apoyo de esta opinión, las palabras de Henri Poincaré son, como siempre, definitivas:

«El científico no estudia la Naturaleza por la utilidad que le pueda reportar; la estudia por el gozo que le proporciona, y este gozo se debe a la belleza que hay en ella. Si la Naturaleza no fuera hermosa, no valdría la pena su estudio, y si no valiera la pena conocerla, la vida no merecería ser vivida. Por supuesto que no hablo aquí de aquella belleza que impresiona los sentidos, la belleza de las cualidades y las apariencias; y no es que desprecie esta belleza (lejos de mí tal cosa), pero no

es ésta la propia de la ciencia; me refiero a aquella belleza más profunda que surge de la armonía del orden en sus partes y que una pura inteligencia puede captar. Esta es la que da cuerpo, estructura, por así decir, a las apariencias que halagan nuestros sentidos, y sin las cuales la belleza de estos sueños fugitivos sería sólo imperfecta por su vaguedad. Por el contrario, la belleza intelectual se basta a sí misma, y es por ella más, quizá, que por el bien futuro de la humanidad, por lo que el científico consagra su vida a un trabajo largo y difícil.» (*Ciencia y método*.)

13.5 Objetividad

En este momento debemos contestar una pregunta que ha surgido insistentemente durante los últimos párrafos: ¿Qué hay de la tan pregonada objetividad de los científicos? Se dice, a menudo, que la investigación se considera «científica» cuando en ella se desecha toda desviación subjetiva. Por ejemplo, Bertrand Russell decía: «El núcleo del quehacer científico, es rehusar tener en cuenta nuestros propios deseos, gustos o intereses cuando buscamos la clave de la comprensión del Universo». Pero ¿cómo puede librarse la búsqueda objetiva de la verdad, del alto grado de carácter personal que hemos mencionado antes? O, puesto que evidentemente éste no ha perjudicado a la ciencia, ¿cómo puede explicarse la discrepancia entre la naturaleza de las motivaciones y la de los resultados?

Hemos retrocedido aquí, por otro camino, hasta el dilema primero, la aparente contradicción en sus funciones, entre S_1 y S_2 . Para resolverlo, comenzaremos considerando un ejemplo extremo, el del físico teórico y astrofísico Sir Arthur Eddington, que tenía unas convicciones tan firmes que llegó a escribir una «Defensa del misticismo». Sus ideas pueden haber tenido «significado», o carecer de él, desde el punto de vista de la ciencia pública S_2 , pueden haber sido el origen, la causa profunda, de su consagración a la búsqueda de la verdad. Lo interesante es que en sus numerosos y notables artículos científicos, no se encuentra nunca una manifestación *expresa* de su misticismo personal, nada que no pudiera ser dicho exactamente igual por un científico de orientación metafísica totalmente opuesta, o de la escuela «dura», que no se interesa, en absoluto, por tales cuestiones. En la ciencia moderna, las creencias filosóficas personales no deben aparecer explícitamente en los trabajos que se publican, no porque no existan, *sino porque no es conveniente*.

Aún podíamos ir más lejos. En una sociedad libre, las creencias metafísicas de los científicos como individuos, aunque, con frecuencia, muy fuertes, son, por lo general, tan variadas, tan vagas y tan ineptas técnicamente, que en cierto sentido se contrarrestan mutuamente o dejan de ser efectivas por falta de base para una aceptación y acuerdo unánime de las mismas. Quizás nuestra ciencia se debilitaría si no funcionase este mecanismo. Donde todavía existe una serie de dogmas, explícita y ampliamente aceptados —como en algunas de las antiguas universidades es-

colásticas o en los estados totalitarios modernos—, sólo allí puede sobrevivir al escrutinio de los científicos la metafísica extraña en una publicación científica en aquel campo y aquel lugar con consecuencias, posiblemente, perjudiciales.

En contraste con las motivaciones, en gran parte inconscientes, de las que no tiene por que dar explicaciones a nadie; las disciplinas intelectuales impuestas a un científico, al igual que la forma de publicación de los trabajos de investigación, están definidas de manera rigurosa; sabe que sus inclinaciones pueden muy bien no coincidir con las de sus colegas y testigos y que los únicos puntos en que pueden estar de acuerdo son las demostraciones rigurosas y los experimentos repetitivos. Las satisfacciones personales en S_1 deben mantenerse en privado y por tanto, desde el punto de vista de S_2 , son incidentales. Podemos ver fácilmente que este severo convenio, en cierto conflicto con el lado humano del experimentador, es una especie de dispositivo sociológico que asegura la evolución rápida de la Ciencia. Cuando se obra bajo el impulso del entusiasmo, las probabilidades de error y equivocación, son grandes. Por esto, el investigador debe forzarse a un severo reexamen de sus trabajos antes de publicarlos, exponiéndolos al juicio imparcial de sus colegas. Luis Pasteur expresaba bien esta actitud cuando escribía:

«Si crees haber hecho algún descubrimiento científico importante y estás febrilmente ansioso por publicarlo, deja pasar unos días, semanas o aun años; intenta derribar tus propios argumentos y experiencias y expón solamente tus descubrimientos después de haber agotado todas las hipótesis en su contra. Si después de tales esfuerzos llegas a la certidumbre, tu alegría será una de las mayores que puede sentir el alma humana.»

El reconocimiento de la necesidad de esta actitud es muy reciente. Anteriormente hubo otras soluciones. Francis Bacon, atacando la ciencia subjetiva de su tiempo, mantenía que el científico, si ha de construir una base firme, debe suprimir, en lo posible, el elemento humano, sus prejuicios, hipótesis prematuras, intuiciones y deseos. A este fin, Bacon esbozaba un procedimiento que prescribía la estructura del trabajo científico tan rígidamente que el elemento humano quedaba marginado. En el contexto histórico, su solución era razonable; podía haber funcionado y parece resolver el problema de cómo permanecer objetivo. Pero a la larga, los científicos han hallado otro procedimiento, menos riguroso, menos seguro, pero más útil para reducir el factor humano sin necesidad de apagar el entusiasmo y los motivos personales, donde reside el principal origen, tanto del error *como* de la verdad. En este procedimiento la disciplina se superpone a la libre creación individual; así, la investigación no está controlada en su desarrollo como el tren en sus raíles, sino como un jinete a caballo que mantiene la dirección con tirones ocasionales, pero firmes, de las riendas.

13.6 Los hechos y su interpretación

Podría preguntarse: ¿por qué es preciso una disciplina impuesta? ¿No hay ya una cierta disciplina en los mismos *hechos* que el científico observa? ¿No están éstos perfectamente determinados? Estas preguntas nos presentan otro problema interesante, que es el de la relación entre los hechos y su interpretación.

Nuestra misma vida, como también nuestra ciencia, dependen, continuamente, de la observación y clasificación de los hechos, y no hay nada más decepcionante que estos mismo hechos. Es casi imposible describir un hecho sin que, al mismo tiempo se intente interpretarlo o hacer alguna hipótesis sobre él, como se pone de manifiesto en las declaraciones de los testigos en una audiencia. Si continuamos adelante, llegaríamos a estar de acuerdo en que los únicos hechos básicos o genuinos son aquellos que impresionan nuestros sentidos más elementales (el que una mancha es blanca o negra, sentir frío o calor, el que un sonido sea agradable o molesto). Sin embargo, estas percepciones son exactamente las que Galileo denominó cantidades secundarias y no es concebible que sean las que han dado origen a nuestra Ciencia. Incluso los animales más simples deben ser capaces de tales observaciones y seguramente, el pensamiento no trata este tipo de experiencias aisladas. Se ha llamado primera ley del pensamiento el que la *percepción* debe pasar al pensamiento y al conocimiento a través de la *conceptualización*. Partiendo de la vaga impresión de «ahora aquí, después allí», el hombre ha llegado a establecer, quizá a lo largo de mil generaciones, ideas tales como las de espacio, cuerpo, posición, distancia, intervalo de tiempo, movimiento, velocidad, sin analizarlas, antes incluso de pensar en su apariencia.

Puesto que los «hechos» no pueden discernirse sin disponer de herramientas intelectuales para tratar las impresiones de los sentidos, el científico debe disponer de ideas preconcebidas y asociaciones, justificadas por los buenos resultados que hayan dado. Admitir esto, pudiera parecer que es contrario a la opinión común de que el primer paso a dar por la ciencia es arrojar todos los prejuicios. Sin embargo, sin ideas preconcebidas son imposibles nuevos pensamientos. Por lo tanto, lo que se requiere en la ciencia, como en otras muchas actividades de la vida, es tener conciencia, en una emergencia, de las ideas preconcebidas, tener precaución en su uso, descartar las que no tengan significado y si los fenómenos demuestran que son erróneas, tener el valor de «pronunciar aquella sabia, modesta e ingeniosa sentencia: 'No sé tal cosa'», como decía Galileo.

Sin nuestros conceptos clave, casi axiomáticos, nos encontraríamos desprovistos intentando describir una montaña, sólo en términos de «hechos puros». No podría hablar, en absoluto, de su altura, pues lo único que ve es un cambio de nivel en el terreno. Aun esto implica también conceptos derivados, y así, en lugar de decir que «la montaña está cortada por valles glaciares», habría de describir una figura de luz y sombras, y cómo debe enfocar sus ojos sobre las distintas partes de su campo de visión.

Así, cuando nuestros pensamientos traten con observaciones y hechos, deben realmente manejar conceptos, construcciones e ideas, con todos los peligros inherentes (peligro de una clasificación errónea, de extrapolaciones y analogías demasiado audaces, de una generalización demasiado ambiciosa o una especialización excesivamente restrictiva). No es extraño que las ciencias físicas atesoren aquellos pocos conceptos (p. ej. longitud, tiempo, masa, carga eléctrica) que, a través de una larga experiencia, han demostrado ser lo suficientemente dignos de confianza para construir sobre ellos todo el edificio de la Ciencia.

Puesto que los datos más concretos son los que comportan solamente lecturas de un indicador o cosas parecidas, la física, según se ha dicho, sólo debería partir idealmente de descripciones de este tipo. Y aún así habría lugar a la discusión, pues ante un experimento habríamos de decidir qué lecturas del indicador eran lo suficientemente significativas e importantes para garantizarnos su descripción. En este sentido, los hechos no existen fuera del observador. Un observador profano que mirase al cielo con un magnífico telescopio, vería pocas cosas interesantes y aún comprendería menos de lo que ve. Pero si un hombre experimentado examina un cometa brevemente unas cuantas veces y con un equipo relativamente pobre, podrá darnos teorías astronómicas que nos permitan saber la velocidad del cometa en cualquier momento, la materia de que se compone, el tiempo en que volverá a aparecer, y otras muchas cosas. En resumen, lo que percibimos de un «hecho», se organiza e interpreta según un sistema completo de actitudes y pensamientos, recuerdos, creencias y construcciones. Es el pensamiento el que nos hace ver.

No sólo los hechos, por sí solos, no conducen a la Ciencia sino que un programa entusiasta de recopilación de hechos *per se* ha retrasado más de una vez el progreso científico y, en opinión de algunos observadores, puede estar ocurriendo así, incluso ahora, en algunas investigaciones contemporáneas sobre partículas elementales y en ciertos problemas médicos. Según ha señalado el científico educador, J. B. Conant, «la ciencia avanza no por la acumulación de hechos nuevos... sino por el continuo desarrollo de conceptos nuevos y fructíferos». La imagen del científico experimental en su bien provisto laboratorio, sometiendo la materia a una observación intensa y sin dirección es ciertamente absurda pero está muy difundida. En particular, cuando hay que utilizar los instrumentos para efectuar observaciones, aun los «experimentos preliminares» están precedidos por una gran actividad no experimental, por el estudio, por la meditación y por el cálculo. Sin esto, los hechos que se obtienen tan costosamente carecerían de significado. Una vez más, sacamos la conclusión de que la Ciencia no la pueden hacer científicos aislados. Para comprender incluso las observaciones más sencillas, cada investigador debe apoyarse en la sabiduría destilada de la Ciencia como institución. Cuando Newton se describía modestamente a sí mismo apoyándose sobre hombros de gigantes que habían efectuado el trabajo científico anterior, pronunciaba una verdad aplicable a todo científico individual.

13.7 Cómo crece la ciencia

Podemos ahora coordinar algunas observaciones sobre el crecimiento de la ciencia que nos ayudarán a adquirir una visión de conjunto. El punto clave es la distinción entre ciencia privada S_1 y ciencia pública S_2 (si se quiere, la diferencia entre Galileo Galilei, como hombre, y su afirmación de que $s \propto t^2$). Esta visión dual de la ciencia tiene una analogía en la consideración de la ley, ya como conjunto de juicios y opiniones jurídicas individuales, ya como *corpus juris*, y también en la consideración de una tribu bien como pueblo (una abstracción clasificada con una organización estable reconocible, costumbres, etc.) bien como un grupo en interacción de personas casi impredecibles individualmente. Mejor aún, comparemos las diferencias entre S_1 y S_2 con la doble interpretación que podría darse de las especies animales, esto es, caracterizándolas por su forma de vida, por la forma de comportarse sus individuos o catalogándolas de un modo sistemático, tal como se hace hoy día en los textos de zoología.

Si examinamos más atentamente esta última analogía —y no es más que una analogía muy útil— el mecanismo de evolución de las especies y el de la Ciencia parecen similares en cuatro aspectos: En primer lugar, tanto en un caso como en otro, el concepto de *crecimiento* presupone un mecanismo de *continuidad*, pues ni las especies animales ni la ciencia pueden persistir, a no ser que exista un medio estable que mantenga su estructura de generación en generación de manera concreta. En biología, el mecanismo de continuidad se halla en el proceso de la herencia, basado en la naturaleza perfectamente específica de los genes. En la ciencia, puede identificarse con las ideas relativas al carácter operacional específico y a la naturaleza cuantitativa de los conceptos importantes. Sin esta continuidad, los científicos no podrían sacar provecho de la comunicación de sus trabajos entre sí y para sus discípulos.

En segundo lugar, sobre la continuidad se halla superpuesto un mecanismo de *mutación*, que ofrece constantemente oportunidad para variaciones individuales. En el caso de las especies biológicas, las mutaciones se producen por influencias físicas y químicas sobre los genes y sobre la partición y recombinación de los cromosomas. En la ciencia, las mutaciones están aseguradas por el carácter esencialmente democrático de la institución y por la fertilidad ilimitada de la mente humana libre*.

* Sin embargo, debemos reservar un nombre especial para aquellas mutaciones raras en la ciencia, para aquellas ocasiones magníficas en que, como en los trabajos de Copérnico, Galileo, Newton, Einstein y Bohr un hombre supera todas las limitaciones humanas y asciende a alturas insospechadas en un «esfuerzo heroico» por utilizar la frase de Sarton. Sin esta medida de heroísmo, profecía o dedicación suprema, la evolución progresiva normal en la ciencia podría llegar a ser tan lenta como la de la evolución natural.

Un tercer mecanismo es la *multiplicidad de esfuerzos*. Para asegurar la continuidad y el crecimiento a pesar de la baja tasa de modificaciones realmente ventajosas, y a falta de un plan maestro según el cual proceder, tanto una especie animal como la ciencia han de recurrir a los esfuerzos de un gran número de individuos para obtener avances que sean realmente importantes. Los innumerables fósiles, antiguos miembros de las especies animales, y las incontables páginas que describen las investigaciones individuales a través de los siglos, son mudos testigos de la prodigalidad del proceso de evolución, tanto de las especies como del conocimiento científico.

Existe, finalmente, un mecanismo de *selección*, por el cual sólo una parte de las múltiples contribuciones y mutaciones se incorporan al flujo continuo de la ciencia (el conflicto entre las ideas no se diferencia mucho de la lucha por la existencia en la Naturaleza, que capacita a las distintas especies para adaptarse a los cambios de ambiente). El que un cambio sobreviva bajo diversas condiciones adversas, tiene su imagen en la ciencia en el sobrevivir de aquellos descubrimientos, conceptos y relaciones que han sido de gran utilidad en muchas aplicaciones posteriores, de aquellos esquemas conceptuales que se mantienen a pesar de su continua confrontación con la experiencia.

Un escéptico podría añadir que la ciencia debe sus éxitos a la claridad y facilidad de su objetivo en contraste con el del arte o la filosofía. Por ejemplo, hay muchas formas de excavar un pozo, algunas, sin duda, muy inexpertas; pero el problema es claro, y más pronto o más tarde el agua se encontrará prácticamente en todas partes. La propia tarea, una vez formulada, es inherentemente una tarea que puede realizarse. Si la ciencia se autolimita a descubrir hechos y relaciones, las mentes pacientes los buscarán y al cabo de un tiempo se habrán encontrado hechos y se habrán podido relacionar. Hay mucha verdad en esto, pero el hombre no es omnisciente ni eterno; por tanto, la cantidad limitada de conocimientos científicos que una persona puede producir, moriría con ella si no fuese capaz de comunicarlos. Además, si no existiese un cierto crecimiento selectivo, tales conocimientos estarían siempre limitados por la capacidad limitada de la mente. *La continuidad o comunicabilidad, la variedad individual, la multiplicidad de esfuerzos libres y el crecimiento selectivo son los cuatro principios sobre los que se basa el éxito de la ciencia.*

Como consecuencia inmediata, aún podemos ver otra relación entre S_1 y S_2 : La «ciencia como institución», a diferencia de un hormiguero construido con las pequeñas contribuciones de sus individuos, no existe solamente en forma de libros, artículos y aparatos de laboratorio, sino que, ante todo, se halla en las mentes de los que en ella trabajan. Todo físico, químico, geólogo o astrónomo realiza dos funciones (y es la fácil confusión entre estas dos la que ha dado lugar a la común imagen errónea de aquel). Por una parte, es innegable que es el creador de la ciencia privada S_1 ; por otra, su mente, junto con las de sus colegas, es el agente por el que se transmite S_2 de una generación a otra. En consecuencia, el contenido de S_2 al

pasar a través de los tiempos, de un grupo de seres racionales al siguiente experimenta continuamente un cambio doble; el correspondiente a un continuo retoque que la haga más concreta y susceptible de comunicar; y el debido al incesante desarrollo que aumenta su significado y validez en el curso de amplias experiencias y profundos experimentos.

Podemos ver ahora, retrospectivamente, los signos de este mecanismo de evolución en la naturaleza de los mismos conceptos físicos. Recordemos las tres características fundamentales de los conceptos científicos: significado operacional, naturaleza preferentemente cuantitativa, y reaparición en distintos campos de aplicación. Todas ellas aseguran la continuación y desarrollo de la empresa científica. Ayudan a la comunicación concreta de problemas y resultados, hacen posible el acuerdo (o desacuerdo) de los diferentes investigadores en la interpretación de los mismos fenómenos y aúnan los esfuerzos de muchos científicos a pesar de estar separados por distintos intereses, el tiempo o el lugar.

13.8 Consecuencias de un modelo

Algunas de las características generalmente aceptadas en toda investigación científica, pueden deducirse de la consideración de que la ciencia como institución se transmite continuamente y sufre modificaciones al paso por las distintas generaciones, y que ostenta las leyes enunciadas de la evolución. En resumen, podríamos considerar los siguientes puntos:

a) *En todo momento*, la conveniencia y libertad para comunicarse son vitales para la misma existencia de la ciencia. El celoso secreto con que los alquimistas ocultaban sus resultados, condenaron sus esfuerzos al estancamiento y retrasaron el nacimiento de la química, del mismo modo que hoy día el secreto impuesto a ciertas investigaciones básicas puede estrangular la corriente vital de la ciencia. Debe defenderse a toda costa el derecho a seguir cualquier dirección de investigación que sea prometedora y la publicación y libre intercambio de toda información científica, si se quiere que la ciencia progrese. Aquí se pone de manifiesto la importancia que tiene la libre y desinteresada investigación en instituciones donde el investigador puede realizar su trabajo, siguiendo la línea que le parezca más conveniente, sin que se le opongan dificultades ni interferencias. En ciencia, como en sociedad, la verdad sólo puede hallarse en el mercado libre de ideas. Sólo el filtro de los años, y no la regulación de los hombres, pueden decidir el valor de las distintas contribuciones.

b) El hecho de que la Ciencia dependa de la comunicación entre los que a ella se dedican explica, en parte, que surjan organizaciones entre científicos. Desde principios del siglo XVII crece la proliferación de canales de comunicación (sociedades,

institutos, revistas, etc.). Reuniones nacionales e internacionales se convocan, regularmente, todos los años por hombres de cada especialidad. Existen organizaciones cuya única misión es efectuar resúmenes, índices y distribuir la inmensa cantidad de comunicaciones científicas. Se han creado comites y celebrado congresos para llegar a un acuerdo en la nomenclatura, definiciones y patrones de medida. A ellos se debe la publicación de volúmenes monumentales de tablas de constantes físicas y químicas. Y existe en ellos una gran avidez por comunicar y compartir los últimos descubrimientos y dificultades.

c) La multiplicidad de esfuerzos no es sólo una frase aplicable al quehacer científico de nuestros antecesores; es también hoy una realidad patente. Como existe el peligro real de que una relación de este tipo, al presentar necesariamente sólo algunos de los avances más espectaculares e históricos de la ciencia, podría distorsionar el sentido de la proporción, demos una ojeada en la biblioteca a una revista mensual de trabajos científicos, por ejemplo el *Physics Today*. El punto a destacar, sobre todo, es la variedad de asuntos, intereses, contribuidores y la aparente importancia de muchos de los artículos. Nadie se atrevería a predecir cuál de estas contribuciones será mejor recordada y utilizada treinta años después. Las mayores revoluciones, las rupturas espectaculares con el pasado, son ciertamente, raras. Puede decirse que un científico u otro ha sembrado aquel mes la semilla que dará lugar a una nueva e insospechada cosecha; pero el progreso de la ciencia no depende de la continuidad del esfuerzo global, tanto como de que sea vigoroso, libre y abierto.

d) Nuestra visión de la ciencia como organismo que obedece a leyes de evolución, nos ayuda a comprender la gran verdad de que, «una vez preparado el ambiente» para un descubrimiento o para la formulación de un esquema conceptual, éste se realiza, a menudo, en distintos lugares casi simultáneamente por investigadores independientes. Al decir que el ambiente está preparado para un avance determinado, queremos decir que se dan, por lo menos, estas tres condiciones: existen *razones* para considerar el problema, esto es, se tiene conciencia del mismo y puede, de hecho, estudiarse de un modo general; además, se dispone de *medios* para su tratamiento, o sea, del instrumental necesario; y esquemas mentales para su *comprensión*, es decir, se pueden reunir sin dificultad los conceptos y esquemas conceptuales necesarios. Cuando todo esto se da simultáneamente, puede suceder que distintos investigadores, consciente o inconscientemente, lleguen a resolver e interpretar del mismo modo el problema.

e) También tenemos ejemplos del fenómeno opuesto: la recusación o desprecio inicial que han experimentado, precisamente, los mayores innovadores, aunque, posteriormente, sus descubrimientos lleguen a tener una amplia aceptación. Si la ciencia pública S_2 no es, simplemente, la suma de las contribuciones individuales, sino que existe, como hemos dicho, en las mentes de muchos científicos, para que una

contribución llegue a formar parte de S_2 será preciso que sea aceptada por éstos. Y esto requiere tiempo, especialmente si la innovación se aparta mucho de la opinión corriente que existe sobre aquella materia. Como hemos visto en la sec. 3.2, esta resistencia inicial a la innovación es deseable, pues a la larga repercute en beneficio de la misma ciencia. Puede también suceder (aunque raras veces) que las ideas de un hombre, consideradas por sus contemporáneos como destructivas, reaparezcan, si bien muy modificadas, como importantes contribuciones, cuando el horizonte científico se ha ampliado lo suficiente en su curso de evolución. La historia de la ciencia muestra claramente que hay que contar también con la colaboración de aquellos que permanecen en la penumbra, pues es preciso aclamar tanto a los héroes como a los soldados anónimos.

f) Del mismo modo que la *libertad* en la ciencia aumenta las posibilidades, tanto de multiplicar los esfuerzos como la variedad de individuos que en ella colaboran, también una ciencia libre tiende, en una producción continua de sus propios instrumentos para avances posteriores, no sólo a autoperpetuarse, sino también a autoacelerarse. Como el conocimiento engendra conocimiento, éste crece en progresión geométrica.

Causa verdadera admiración que la ciencia, después del primer ímpetu auténtico a principios del siglo XVII, se haya extendido por toda Europa en el espacio de un siglo. Aunque las causas fueron complejas, como hemos visto, se puede decir que dos factores contribuyeron a ello de un modo decisivo: Por una parte, la ciencia europea, a partir del siglo XIV, se había extendido y progresado hasta el punto de que la multiplicidad de esfuerzos y la variedad de individuos constituían un valor efectivo; por otra parte, los trabajos de Galileo y sus contemporáneos establecieron actitudes y conceptos que, por su carácter cuantitativo y operacional, permitían la continuidad en la ciencia, mucho mejor que antes, con lo cual le dieron el impulso que había de conducir a prestarle el carácter consistente que presentaba a comienzos del siglo XVIII.

g) Como la mente del hombre no está dividida en compartimientos estancos, y como la ciencia existe en forma de un complejo de esquemas conceptuales que se propagan a través de las mentes de los hombres, llegamos a la conclusión de que unos interactúan con otros, que la ciencia influye en el esquema cultural de la sociedad y, a su vez, es modelada por ésta. Es natural que, por ejemplo, el argumento de Galileo sobre el movimiento de los cuerpos celestes, como el de sus adversarios, haya sido matizado una y otra vez por la teología contemporánea y que el impacto del trabajo de Newton sobre el pensamiento de la Europa del siglo XVIII se haya extendido más allá de las cuestiones meramente científicas.

Cuando estudiamos los efectos de largo alcance de la ciencia, observamos que toda persona ahora viva, tanto si ha estudiado ciencias como si no, es intelectual-

institutos, revistas, etc.). Reuniones nacionales e internacionales se convocan, regularmente, todos los años por hombres de cada especialidad. Existen organizaciones cuya única misión es efectuar resúmenes, índices y distribuir la inmensa cantidad de comunicaciones científicas. Se han creado comites y celebrado congresos para llegar a un acuerdo en la nomenclatura, definiciones y patrones de medida. A ellos se debe la publicación de volúmenes monumentales de tablas de constantes físicas y químicas. Y existe en ellos una gran avidez por comunicar y compartir los últimos descubrimientos y dificultades.

c) La multiplicidad de esfuerzos no es sólo una frase aplicable al quehacer científico de nuestros antecesores; es también hoy una realidad patente. Como existe el peligro real de que una relación de este tipo, al presentar necesariamente sólo algunos de los avances más espectaculares e históricos de la ciencia, podría distorsionar el sentido de la proporción, demos una ojeada en la biblioteca a una revista mensual de trabajos científicos, por ejemplo el *Physics Today*. El punto a destacar, sobre todo, es la variedad de asuntos, intereses, contribuidores y la aparente importancia de muchos de los artículos. Nadie se atrevería a predecir cuál de estas contribuciones será mejor recordada y utilizada treinta años después. Las mayores revoluciones, las rupturas espectaculares con el pasado, son ciertamente, raras. Puede decirse que un científico u otro ha sembrado aquel mes la semilla que dará lugar a una nueva e insospechada cosecha; pero el progreso de la ciencia no depende de la continuidad del esfuerzo global, tanto como de que sea vigoroso, libre y abierto.

d) Nuestra visión de la ciencia como organismo que obedece a leyes de evolución, nos ayuda a comprender la gran verdad de que, «una vez preparado el ambiente» para un descubrimiento o para la formulación de un esquema conceptual, éste se realiza, a menudo, en distintos lugares casi simultáneamente por investigadores independientes. Al decir que el ambiente está preparado para un avance determinado, queremos decir que se dan, por lo menos, estas tres condiciones: existen *razones* para considerar el problema, esto es, se tiene conciencia del mismo y puede, de hecho, estudiarse de un modo general; además, se dispone de *medios* para su tratamiento, o sea, del instrumental necesario; y esquemas mentales para su *comprensión*, es decir, se pueden reunir sin dificultad los conceptos y esquemas conceptuales necesarios. Cuando todo esto se da simultáneamente, puede suceder que distintos investigadores, consciente o inconscientemente, lleguen a resolver e interpretar del mismo modo el problema.

e) También tenemos ejemplos del fenómeno opuesto: la recusación o desprecio inicial que han experimentado, precisamente, los mayores innovadores, aunque, posteriormente, sus descubrimientos lleguen a tener una amplia aceptación. Si la ciencia pública S_2 no es, simplemente, la suma de las contribuciones individuales, sino que existe, como hemos dicho, en las mentes de muchos científicos, para que una

contribución llegue a formar parte de S_2 será preciso que sea aceptada por éstos. Y esto requiere tiempo, especialmente si la innovación se aparta mucho de la opinión corriente que existe sobre aquella materia. Como hemos visto en la sec. 3.2, esta resistencia inicial a la innovación es deseable, pues a la larga repercute en beneficio de la misma ciencia. Puede también suceder (aunque raras veces) que las ideas de un hombre, consideradas por sus contemporáneos como destructivas, reaparezcan, si bien muy modificadas, como importantes contribuciones, cuando el horizonte científico se ha ampliado lo suficiente en su curso de evolución. La historia de la ciencia muestra claramente que hay que contar también con la colaboración de aquellos que permanecen en la penumbra, pues es preciso aclamar tanto a los héroes como a los soldados anónimos.

f) Del mismo modo que la *libertad* en la ciencia aumenta las posibilidades, tanto de multiplicar los esfuerzos como la variedad de individuos que en ella colaboran, también una ciencia libre tiende, en una producción continua de sus propios instrumentos para avances posteriores, no sólo a autoperpetuarse, sino también a autoacelerarse. Como el conocimiento engendra conocimiento, éste crece en progresión geométrica.

Causa verdadera admiración que la ciencia, después del primer ímpetu auténtico a principios del siglo XVII, se haya extendido por toda Europa en el espacio de un siglo. Aunque las causas fueron complejas, como hemos visto, se puede decir que dos factores contribuyeron a ello de un modo decisivo: Por una parte, la ciencia europea, a partir del siglo XIV, se había extendido y progresado hasta el punto de que la multiplicidad de esfuerzos y la variedad de individuos constituían un valor efectivo; por otra parte, los trabajos de Galileo y sus contemporáneos establecieron actitudes y conceptos que, por su carácter cuantitativo y operacional, permitían la continuidad en la ciencia, mucho mejor que antes, con lo cual le dieron el impulso que había de conducir a prestarle el carácter consistente que presentaba a comienzos del siglo XVIII.

g) Como la mente del hombre no está dividida en compartimientos estancos, y como la ciencia existe en forma de un complejo de esquemas conceptuales que se propagan a través de las mentes de los hombres, llegamos a la conclusión de que unos interactúan con otros, que la ciencia influye en el esquema cultural de la sociedad y, a su vez, es modelada por ésta. Es natural que, por ejemplo, el argumento de Galileo sobre el movimiento de los cuerpos celestes, como el de sus adversarios, haya sido matizado una y otra vez por la teología contemporánea y que el impacto del trabajo de Newton sobre el pensamiento de la Europa del siglo XVIII se haya extendido más allá de las cuestiones meramente científicas.

Cuando estudiamos los efectos de largo alcance de la ciencia, observamos que toda persona ahora viva, tanto si ha estudiado ciencias como si no, es intelectual-

mente hija de Copérnico y Galileo, Isaac Newton y Faraday, Einstein y Niels Bohr.* Nuestra imaginación y nuestros instrumentos intelectuales fueron modelados en gran manera por los avances que en el conocimiento de la física, ellos y sus contemporáneos, hicieron hace muchos años. Es fácil mostrar que cuando el mundo de Copérnico y Newton triunfó en el Oeste, el reconocimiento de que una ley uniforme influye sobre toda la materia en todas partes ayudó a vencer el pensamiento jerárquico y a preparar la mente para una democracia de autoconfianza. Sabemos, también, que en el siglo XIX los éxitos de la estadística y el concepto de la energía prepararon el terreno para la modernización del mundo de Newton.

Además del tipo de influencia de largo alcance que el trabajo de Newton tenía en la imaginación de los escritores y filósofos desde el siglo XVIII, existen igualmente, los efectos materiales asociados a los avances realizados por James Watt, Faraday y Fermi. De la comprensión del trabajo de la máquina de vapor surgió una transformación de la sociedad durante todo un siglo la cual se denomina *Revolución Industrial*. De los «juguetes» de Faraday surgieron los motores y generadores eléctricos y, con el tiempo, los ascensores eléctricos, los trenes y ferrocarriles subterráneos que facilitaron el crecimiento de las ciudades en extensión y en altura. De igual modo, los experimentos del grupo de Fermi sobre la radiactividad artificial inducida por neutrones, prepararon el estudio de la fisión nuclear, y éste, a su vez, dio lugar al diseño de nuevas fuentes de energía que constituirán, probablemente, los medios principales para satisfacer nuestras necesidades energéticas en crecimiento frenético.

Naturalmente, es más difícil prever los efectos de largo alcance de la ciencia sobre los cambios sociales que ver sus inmediatas influencias prácticas. Para evitar posibles efectos negativos y capitalizar los positivos, sólo existe una política: el esfuerzo de una vigilancia sin compromiso, tanto de ciudadanos como de científicos. Debemos llamar la atención acerca de los abusos existentes del conocimiento científico y de las técnicas, así como mantenerse al día sobre los avances de la ciencia y estar dispuestos para que ésta no se desorbite y dé lugar a abusos en el futuro.

Para volver al significado de la ciencia, no como un mero estudio técnico, sino como una parte del desarrollo humanístico general, podemos ilustrar este sentido de interconexión con dos diagramas simples. El curso de física, tal como se da tradicionalmente en muchas clases, semeja a una serie de cuentas ensartadas en un hilo. Una materia sigue a la otra, desde la cinemática de Galileo a los avances más recientes de la física nuclear. Esta secuencia es la usual, más o menos paralela al desarrollo de la ciencia, aunque este paralelismo, a veces, no sea explícito. Pero pocas conexiones suelen hacerse con otras realizaciones de los seres humanos no fi-

* La mayor parte del resto de esta sección está adaptada de un artículo de Gerald Holton, «The relevance of Physics», *Physics Today*, noviembre de 1970, por autorización del American Institute of Physics.

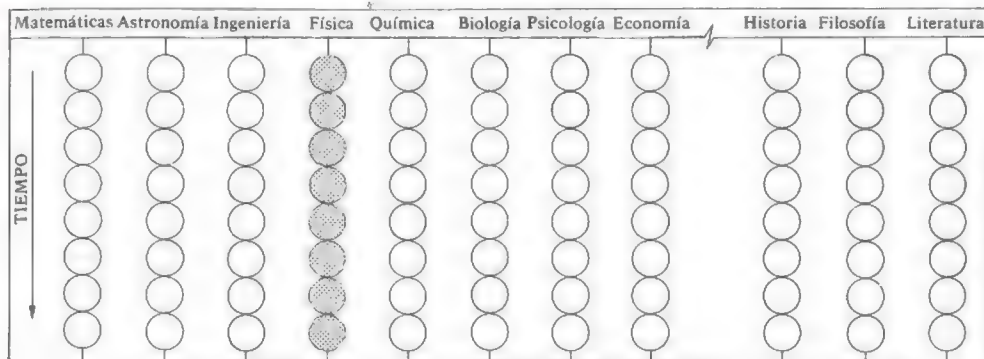


Fig. 13.1 Tradicionalmente se piensa en la física como si se tratara de una ciencia separada e independiente de las restantes disciplinas y como si estuviera formada por secciones separadas como cuentas enhebradas en un hilo.

sicos, con ciencias distintas a la física y con estudios o actividades no científicas. Igualmente suele ocurrir que las materias estudiadas en otros cursos (por ejemplo, química, biología, literatura) también cuelgan como cuentas ensartadas en hilos separados (véase fig. 13.1).

Esta presentación en forma de hilos de cuentas tiene algunas ventajas. Por ejemplo, es conveniente para enseñar y para aprender. Pero ignorar las conexiones que existen entre todos estos campos, es no hacer justicia al estado actual de la situación. Un proyecto de investigación en física experimental, por ejemplo, más pronto o más tarde, utiliza materias no sólo de casi todas las partes de la física, sino también de matemáticas, metalurgia, termodinámica química, ingeniería electrónica, tecnología de calculadoras y muchas otras ciencias, así como psicología de grupos, contabilidad y destreza para escribir sobre el propio trabajo. Además, nadie que esté involucrado en el trabajo científico actual puede dejar de ver la influencia que poseen los avances científicos en función de las consecuencias sociales y prácticas. La física «pura» es una invención que existe sólo en las aulas más anticuadas. Si escogemos un problema real de física (o cualquier otra ciencia), encontraremos conexiones con una serie de problemas, unos esperados, y otros inesperados, que a primera vista parecen «pertener» a otras profesiones.

Creemos que éste es un argumento en favor de la inclusión ocasional en un curso de física de algunos temas normalmente no incluidos. Pensemos, por ejemplo, en el estudio de la mecánica de Newton aplicada al movimiento planetario, tema que usualmente no es más que una de las cuentas enristradas en la cadena de física. Newton había estudiado teología y filosofía, y esta influencia surge en los *Principia* en aquellas secciones que tratan de la naturaleza del tiempo y del espacio

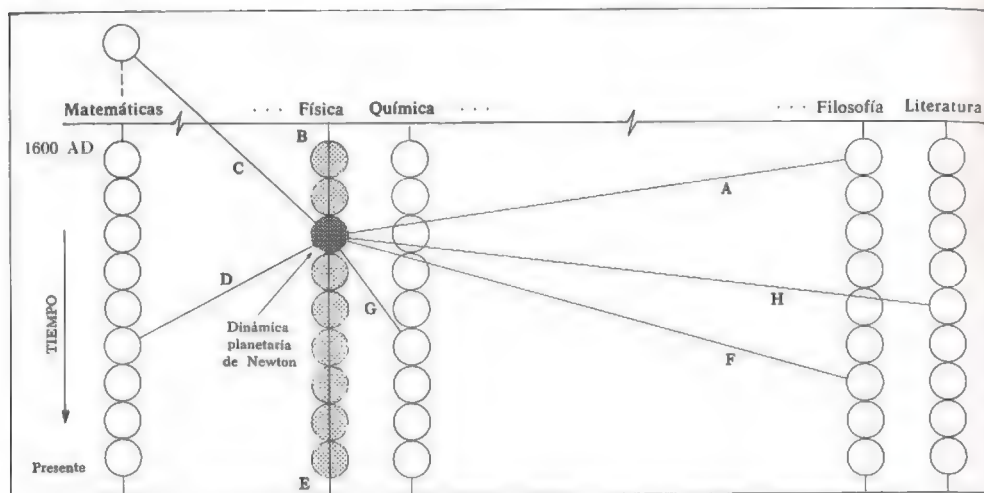


Fig. 13.2 Un ejemplo de las interconexiones de todos los campos. La dinámica de Newton está ligada a los logros del pasado y del presente, no sólo en la Física, sino también en otros campos.

(véase fig. 13.2, conexión A a filosofía). Dentro de la propia física, Newton llevó a la culminación del trabajo de Kepler y Galileo (conexión B). Gran parte de las matemáticas establecidas en el trabajo de Newton procedían de los griegos (conexión C). Nuevas matemáticas, particularmente las ideas básicas del cálculo, fueron inventadas por Newton para ayudar a sus propios progresos y, con ello, dar lugar al avance de las matemáticas (conexión D).

Dentro de la física, todos los que siguen a Newton usan sus leyes y enfoques (conexión E). Sus efectos sobre los teólogos (conexión F), sobre los modelos atómicos de John Dalton en química (conexión G) y sobre la sensibilidad artística del siglo XVIII con la influencia de Newton sobre las musas (conexión H) están muy documentadas.

El mismo tipo de red se extiende alrededor de cada uno de los principales temas de la física. Pensemos en la conexión existente entre la filosofía y el trabajo de Hans Christian Oersted, André Ampère y Farady en la electricidad (a través de su interés por la *Filosofía Natural*). Pensemos en la conexión que va retrospectivamente desde la física nuclear a lo largo de la cadena de cuentas hasta la física clásica de tres siglos antes (como en la determinación de la masa del neutrón) y en las conexiones laterales con la biología, la ingeniería y, ciertamente, la política, debido a las diversas aplicaciones y subproductos de los reactores nucleares, por ejemplo.

Tales lazos de unión existen entre las principales realizaciones en muchos campos. Si dibujáramos todas las conexiones que ligan los distintos campos del mapa

intelectual, tendríamos, en lugar de hilos separados de cuentas, un tapiz, una fábrica de ideas. La ciencia está en interacción dinámica con la actividad intelectual total de una época. En un sentido profundo, la ciencia es parte del estudio de la historia y de la filosofía y sirve de base al trabajo del artista, del mismo modo que penetra en la explicación que una madre da a su hijo para ayudarle a entender cómo se mueven las cosas.

Si tratáramos de prescindir en nuestras ideas de los logros de la física, el curso de la historia moderna sería casi incomprensible. No entenderíamos y, en efecto, no tendríamos mucho que hacer con el trabajo de John Locke, Voltaire y Alexander Pope, hombres, que entre muchos otros, se inspiraron, francamente, en el trabajo de los físicos contemporáneos. Al revés, la filosofía, las matemáticas y otros campos serían estudios mucho más vacíos si no se hubieran completado y ampliado con los trabajos de los científicos filósofos como Ernst Mach, Einstein y Bohr. Eliminar la física significaría, naturalmente, renunciar a la historia del desarrollo industrial que siguió a la máquina de vapor de Watt, a la pila eléctrica de Alessandro Volta, y a los motores y generadores de Faraday. Una ciencia vecina, tal como la química, no se hubiera desarrollado sin los modelos de los gases y las teorías de la estructura atómica que fueron en gran manera trabajo de los físicos. En resumen, si separásemos del conjunto del tapiz el hilo denominado «física» —como algunos anticientíficos pretenden hacer—, todo el tejido se deshilaría como un viejo jersey; lo mismo ocurriría si se tirase de cualquiera de las otras hebras. Desde este punto de vista, por tanto, la relevancia de cualquier campo del conocimiento, incluyendo la física, es que se trata de una parte integral del desarrollo total del pensamiento.

h) Consideremos otro punto de interés universal, aunque otros se sugerirán fácilmente por sí mismos. Hemos visto que no es posible prever el curso de la ciencia; sólo en raras ocasiones puede valorarse un descubrimiento en el momento en que se realiza y predecir su importancia y el lugar que ocupará en la ciencia. Por la misma razón, no podemos decir si un descubrimiento se aplicará en beneficio de la humanidad o la pondrá en peligro o responde, simplemente, a los deseos de la sociedad. Como ejemplo, podemos considerar el fenómeno de la radiactividad, descubierto, casualmente, por Henri Becquerel al exponer a la radiación de una sal de uranio una placa fotográfica que había dejado en sus proximidades (las guardaba en un cajón esperando realizar un experimento inspirado en una hipótesis razonable, pero falsa). Becquerel no comprendió el significado de sus observaciones; fue por los arduos trabajos de los Curie, que llegaron a aislar e identificar nuevos elementos radiactivos, con lo que se abrió un horizonte insospechado para la física y la química; además, estos descubrimientos estimularon el trabajo de nuevas generaciones de científicos y condujeron, directa e indirectamente, a revolucionar el modelo conceptual de átomo, radiación y reacciones químicas, y entrañaron muchas consecuencias prácticas, tales como el tratamiento de ciertas enfermedades. Recor-

demostramos que hoy día la radiactividad es un instrumento indispensable en muchos estudios muy alejados del campo del descubrimiento: en biología, geología, astrofísica, metalurgia, también arqueología, y muchas otras actividades científicas. ¡Seguramente, nadie se atreverá a poner límites al desarrollo de los descubrimientos!

Consideremos, finalmente, el gran dilema contemporáneo: La energía «atómica» (nuclear) puede poner a nuestro alcance la piedra filosofal a través de las *aplicaciones* industriales del descubrimiento de recursos energéticos limpios y baratos, puede llevarnos a una era feliz para la que estamos difícilmente preparados —o puede ayudar, mediante las aplicaciones por parte de aquellos que fabrican y desean utilizar armas nucleares, a poner fin a la corta historia de nuestra especie. Todos los gobiernos del mundo «civilizado» desarrollan simultáneamente planes para la construcción de máquinas para la industria y para la destrucción a gran escala (la «deshumanización» como decía una nota oficial) de zonas consideradas hostiles.

Pero como nuestro análisis ha demostrado, debe tenerse cuidado en no confundir la ciencia con el desarrollo tecnológico, militar u otras aplicaciones de ella derivadas. La ciencia y la tecnología están relacionadas, pero son separables. Es perfectamente posible, e incluso prudente, limitar o prohibir algunas aplicaciones tecnológicas, como ocurre en los tratados de control de armamentos o en la decisión de no construir un avión supersónico de transportes antieconómico que sería una amenaza del ambiente. El progreso de la humanidad, e incluso de la tecnología, puede depender de tales decisiones negativas y no de producir o de hacer todas las cosas que son posibles de producir o hacer.

La cuestión es totalmente distinta en el caso del progreso del entendimiento de la propia ciencia básica. Tal progreso, como muestran los ejemplos de Becquerel y Curie, a menudo avanza en una forma no planeada e inesperada. Sería una amenaza mortal para la ciencia prohibir o dificultar el avance de la ciencia fundamental. Y, aunque el conocimiento sin la prudencia humana puede fracasar, un conocimiento *inferior* difícilmente nos asegura la prudencia o la supervivencia; además, es dudoso, al menos, que la ignorancia sea ahora posible o digna de vivir. Pues la salvación o el desastre no se alcanzan por caminos separados, de tal modo que se pueda elegir uno y evitar el otro; ambos se encuentran al final del mismo camino y la elección nos corresponde a nosotros. Si intentáramos resolver el dilema por un control oficial de la ciencia, habríamos de someternos a una censura que, incapaz de prever el resultado de la curiosidad y el futuro de los descubrimientos, tendría que desechar toda especulación inteligente. Con seguridad, esto significaría la pérdida, junto con la ciencia, de nuestras libertades fundamentales y de toda esperanza de un futuro luminoso. Estos efectos serían tan desastrosos para la sociedad como la venganza de un conquistador salvaje.

Si buscamos otra solución, podríamos intentar aprender la lección que nos brinda el mismo desarrollo de la ciencia: *la maravillosa capacidad de los hombres para llegar a la verdad por el libre y vigoroso intercambio de inteligencia.*

Hay aún otra razón por la cual es erróneo buscar la relevancia de la ciencia solamente en función de los beneficios inmediatos para la tecnología. No sólo los avances tecnológicos han traído, con demasiada frecuencia, problemas sociales importantes como subproductos, sino que, además, estos problemas no pueden resolverse, o incluso apropiadamente entenderse, por medios exclusivamente científicos, tecnológicos o políticos. Tales soluciones dependen, en gran extensión, de nuevos avances básicos, y no de los avances de la propia ciencia. En el núcleo de los problemas sociales creados por el avance tecnológico está la *ausencia* del conocimiento científico específicamente básico. La comprensión de esto impone todo un nuevo mandato a la investigación científica básica.

Los ejemplos vienen fácilmente a la mente. Es muy corriente decir, por ejemplo, que el explosivo aumento de población es debido, en parte, al avance de la ciencia médica (mejores condiciones sanitarias, vacunas, antibióticos). Pero, igualmente, podría decirse que el incremento explosivo de la población es debido a un insuficiente conocimiento de la ciencia pura. Es decir, el complejo problema de la superpoblación es debido, en alto grado, a nuestra ignorancia del proceso básico de la concepción (su biofísica, bioquímica y fisiología). No sorprende que los intentos de controlar la población sean tan mediocres. Lo que resulta asombroso es que el primer laboratorio médico de los EE.UU., destinado específicamente al estudio de todo alcance de los problemas científicos del proceso de reproducción, esté ahora en construcción.

De igual modo se dice, a veces, que el progreso de la física es responsable de la carrera de armamentos. Sin embargo, es más exacto decir que los tratados sobre el control de las armas nucleares son difíciles de conseguir porque el conocimiento insuficiente de la geofísica hace embarazosa la inspección, con sismógrafos, de ensayos con armas ilegales. Será necesario, pues, un mejor conocimiento de la geofísica antes de que algunas naciones consideren segura la firma de tratados de control de armamentos que prohíban los ensayos de explosiones subterráneas.

El problema de suministrar alimentos a los pueblos hambrientos en tierras áridas próximas al mar como Perú, la India o la República Árabe Unida es, en gran manera, un problema de logística y administración. Pero es también un problema de ciencia básica: Antes de que puedan diseñarse más plantas económicas de desalinización, es necesario una mejor comprensión de la estructura líquida (uno de los más viejos, pero más olvidados problemas de la física y la química) y del flujo a través de membranas. La contaminación es, naturalmente, el resultado de la voracidad, estupidez, apatía y falta de autoridad de las leyes. Pero para limpiar más eficazmente las áreas de atmósfera contaminada, se requiere un mejor conocimiento de la meteorología, así como de la física y la química de la combustión. Y, entre tanto, hasta hoy, el dispositivo más eficaz e insuficientemente utilizado para librar-nos de la contaminación por partículas sólidas, sigue siendo el precipitador electrostático, que esencialmente funciona basándose en principios físicos conocidos desde 1600.

Estas observaciones tienen por objeto oponernos a dos nociones corrientes, pero erróneas: Primero, que la ciencia básica es un lujo innecesario que debería apoyarse sólo si está dirigida a una aplicabilidad práctica inmediata, y segundo, que una forma de detener los abusos, que son subproductos de la innovación técnica, es detener la ciencia (cuando en realidad la eliminación de los abusos depende a menudo de adelantos científicos que aun están por lograrse).

Capítulo 14

Sobre el descubrimiento de las leyes

Después de examinar, con alguna extensión, el carácter de los conceptos físicos y las relaciones entre los científicos y su trabajo, volvamos a la cuestión de si puede decirse algo positivo acerca del proceso del descubrimiento de las leyes específicas* de la ciencia. Será interesante consultar, en primer lugar, la opinión de los científicos y, después, establecer un modelo que represente el proceso del descubrimiento.

14.1 Opiniones sobre el procedimiento científico

Recordemos, ante todo, que no es de esperar una uniformidad de procedimientos. Aunque nunca ha cristalizado un sentimiento unánime entre los científicos acerca de los principales elementos del proceso científico, existe, sin embargo, algunas ideas que les han ayudado de un modo considerable, y de ellas, cinco, se han repetido tan frecuentemente, que es de interés considerarlas. Ninguna de estas ideas

* La palabra «ley» usualmente se reserva en las ciencias físicas para aquellas afirmaciones de generalidad fidedigna cuya descripción incluye relaciones matemáticas. Otras palabras se utilizan, frecuentemente, para aquellos enunciados que son, principalmente, cualitativos (por ejemplo, la afirmación de que las componentes horizontal y vertical en el movimiento de los proyectiles se suman sin perturbarse mutuamente) o cuando corresponden a la naturaleza de un modelo o un mecanismo oculto que ayudan a la comprensión de los fenómenos (por ej., la idea de que las reacciones químicas son explicables y predecibles considerando que la materia está formada por partículas). En aquellos casos, pueden encontrarse varios términos: «principio» (por ej., principio de superposición), «hipótesis» en un sentido amplio, o «teoría» en sentido limitado (por ej., hipótesis de Avogadro o teoría atómica), «postulado», «regla», etc. No daremos demasiada importancia a las posibles diferencias entre estas palabras y usualmente nos referiremos a todas ellas como *leyes*, de momento.

por sí mismas nos lo dicen todo. Ninguna puede adoptarse prescindiendo de las otras. Más bien las consideraremos como cinco aspectos complementarios de una misma opinión general, dependiendo las proporciones del problema en particular de que trate, y también del científico que de él se ocupe.

a) El primer aspecto que consideraremos se encuentra resumido en una observación hecha por Priestley,* quien destaca: «Se debe más a lo que llamamos *casualidad*, esto es, filosóficamente hablando, a la observación de sucesos que *surgen de causas desconocidas* (insospechadas), que a algún *propósito* o *teoría* determinada. Esto no aparece en los trabajos de aquellos que escriben sintéticamente sobre estos temas...».

Aparentemente, parecería que en lugar de ayuda, el papel del azar serviría para impresionarnos en el trabajo científico. Recordemos la observación de Newton de que la caída de una manzana atrajo su atención hacia el principio de gravitación o cómo la ley del péndulo simple se le ocurrió a Galileo mientras observaba una lámpara que oscilaba en la catedral de Pisa. Las primeras observaciones que condujeron en su época al descubrimiento de la batería, de la mayoría de los elementos, de los rayos X, de la radiactividad y de la quimioterapia contemporánea fueron hechas, más o menos, por azar. Con relación a esto, W. I. B. Beveridge escribe en su libro *The art of Scientific Investigation* (1951):

«Probablemente, la mayoría de los descubrimientos en biología y medicina se realizaron de un modo inesperado, o al menos hubo un elemento de azar en los mismos, especialmente en los más importantes y revolucionarios.»

Esto refuerza lo que se ha visto antes relativo al elemento irracional que existe en el proceso del descubrimiento. Sin embargo, debemos tener en cuenta todas las circunstancias. La mayoría del trabajo científico es poco espectacular, tanto en sus comienzos como en su desarrollo; si interviene el azar, es después de un trabajo asiduo y duro. Lo que es cierto de los métodos científicos, es que de ninguna manera son atajos; operan en el marco de una vida consagrada al laboratorio, a la mesa de trabajo o a las expediciones de aplicación práctica.

Y, además, existe un dicho indiscutible: «el azar favorece a las mentes preparadas». Es evidente que los grandes descubrimientos científicos no los han realizado, en general, personas que ignoraban previamente tales cuestiones. Solamente el que es maestro en una materia puede sacar provecho propio de lo que parece poco razonable. Las observaciones casuales tienen importancia si despiertan una serie de ideas capaces de explicar sistemáticamente los fenómenos. Esta acción de disparo del azar no ha de despreciarse, pero para interpretarla correctamente debe darse

* *Experiments and Observations on Different Kinds of Air* (1776).

prioridad a la formación y al pensamiento sobre la materia general del descubrimiento. En resumen, se debe adquirir cierta sensibilidad para reconocer una serie de sucesos favorables, aunque inesperados.

b) No debemos despreciar el punto de vista de Priestley como erróneo, sino colocar, en lugar más preeminente, otros elementos del proceso del descubrimiento. Uno de estos otros elementos lo ha descrito de un modo magistral P. W. Bridgman:

«El método científico, por ser un método, no es sino condenarse uno con su propia mente, no hay barreras... Esto significa, en particular, que no se conceden privilegios especiales a la autoridad o a la tradición, que se ha de tener especial cuidado en evitar los prejuicios personales y las predilecciones, que continuamente ha de comprobarse si se está cometiendo algún error, y que debe seguirse cualquier línea de investigación que parezca prometedora. Todas estas reglas son aplicables a cualquier situación de la que se quiera obtener una respuesta adecuada y no son sino manifestaciones de inteligencia.»*

Recordando lo dicho anteriormente acerca de la falta de *un* método, de la variabilidad entre científicos y sus métodos, será fácil estar de acuerdo con la afirmación de Bridgman. Ello se debe a que solemos utilizar al máximo la inteligencia como base común para la diversidad de enfoques individuales.

c) En esta misma línea, otros (entre ellos Max Planck, el descubridor de los conceptos cuánticos) consideran su trabajo como una simple ampliación y perfeccionamiento del sentido común. En principio, este punto de vista puede parecer incompleto ya que sólo a causa de que los científicos al tratar en conjunto los problemas cotidianos del sentido común difícilmente pueden pretender tener mucha más aptitud que sus vecinos no científicos. Debemos admitir que existen muchas relaciones entre Ciencia y sentido común, por ejemplo, que las nociones y técnicas primitivas surgen de la experiencia precientífica, que la Ciencia tuvo su origen, hasta cierto punto, en el sentido común de los primeros artesanos y que incluso hoy gran parte de la investigación proviene de una especie de sentido común técnico o de un empirismo de aproximaciones sucesivas, particularmente en las ciencias aplicadas y en el vecino continente de la tecnología. Pero cuando nos ocupamos de los hombres que trabajan modernamente en Física con esquemas conceptuales como el de la teoría nuclear, su sentido común sólo es «común» en lo que se refiere a que sus dotes y formación particulares les permiten hallar el camino a través de sus problemas de manera tan natural como lo encuentra el artesano al realizar su propio trabajo.

* P. W. Bridgman, *Reflections of a Physicist*, New York: Philosophical Library (1950).

d) Lo anterior se complementa con otra opinión que contempla la esencia del procedimiento científico en cierta variación de una opinión resumida de Poincaré, (debidamente cualificada): «El método científico consiste en la observación y la experimentación.» Esta afirmación tiene una gran amplitud de interpretaciones, correctas y falsas. En último caso, puede referirse a la técnica que ya defendía Bacon (una ordenada investigación experimental de los hechos, manteniendo la mente libre de la influencia de ideas preconcebidas). Los hechos debían interpretarse o explicarse solamente al final, por un proceso de «verdadera» inducción, esto es, una inducción no corrompida por hipótesis formuladas prematuramente. Ahora bien, todo proyecto de investigación puede llegar a un punto en que los trabajos teóricos de meses, y aun de años, realizados en gran escala, necesitan, para su comprobación, datos experimentales suficientes; y es cierto, además, que durante la toma de datos o el progreso de un cálculo los científicos usualmente tratan de reducir la probabilidad de los errores que puede afectar a un resultado específico, gustando del propio juego, por decirlo así, más que del resultado final. Sin embargo, ésta es, después de todo, tan sólo una forma inteligente de actuar y coincide también con lo que hemos llamado disciplina impuesta a los científicos; más pronto o más tarde es seguro que alguien comprobará y repetirá sus experimentos, observaciones y cálculos y descubrirá los fallos y las propias decepciones.

Si podemos adaptar la mente al nivel de control y ascetismo de Bacon, a la observación y a la experimentación totalmente imparcial y si todo el procedimiento es fructífero como plan, habríamos tenido razón en dudar. La historia reciente de la mayoría de descubrimientos científicos niega tajantemente estas proposiciones. Seguramente, los experimentos de Galileo con el plano inclinado no fueron resultado de un simple deseo de observar lo que ocurría cuando una esfera caía rodando por él. Por el contrario, es posible que Galileo supiera de antemano qué tipo de resultado obtendría en sus experimentos. Un cierto conocimiento previo o sentimiento de la clase de solución que se espera es casi inseparable del reconocimiento de la *existencia* del problema. Galileo confesaba su convicción de que la Naturaleza actúa del modo más simple posible; de aquí que buscarse relaciones muy simples entre las distancias, los tiempos y las velocidades. Interesan ahora algunos criterios para que la atención del experimentador se concentre sobre ciertos aspectos de la experiencia y excluya el resto; las medidas de s , t , etc., en experimento controlado sólo serán válidas para llegar a una solución si dichos factores y no otros nos permiten determinar realmente las características de la caída libre. Desde luego, a este nivel no puede esperarse gran cosa de nuestra sagacidad; podrían sugerirse por sí mismos muchos elementos que resultarían ser fútiles. Por ejemplo, Galileo parece haber sospechado inicialmente que la materia que constituía el cuerpo determinaba su ley de caída, pero al final se manifestó en contra de este hecho. En cambio, el indicio principal puede suceder que aparezca solamente al final de una larga investigación. En conjunto, este problema es análogo al del artesano que debe tener, al menos, una idea de lo que busca antes de decidirse por el medio y herra-

mientas para llevar a cabo su trabajo. El experimentador, particularmente, debe diseñar sus aparatos y procedimientos con una clara idea del tipo y magnitud del fenómeno que espera, teniendo en cuenta los posibles errores y el efecto enmascarador de efectos secundarios. Es decir, el científico no puede limitarse estrictamente a observar y experimentar. No puede, simplemente, *investigar*; ha de investigar *algo*, y debe tener alguna idea de lo que espera encontrar (de otro modo puede pasar por la solución sin reconocerla).

Así pues, ¿qué es lo que aún queda de la opinión de que «el método científico consiste en observar y experimentar»? Mucho; sobre todo esto: si nos ponemos a teorizar al principio o al final, tanto si inducimos como si deducimos las leyes importantes, o si utilizamos una mezcla de ambos procesos, tarde o temprano deberemos someter nuestro trabajo a una comprobación experimental. Incluso en el ejemplo supremo del trabajo teórico «puro» que es la teoría de la Relatividad generalizada, al final del desarrollo teórico Einstein se vuelve hacia los aspectos de observación y experimentación científicos estudiando varias comprobaciones experimentales posibles de la teoría. Aun cuando solía ser un tanto escéptico acerca de las demandas y prioridades de la experimentación, acerca de una tal comprobación decía llanamente: «Si el corrimiento hacia el rojo de las rayas espectrales... no existiera, la teoría de la Relatividad generalizada sería insostenible» (*Relativity*, 1920). Aquí, de nuevo, nos encontramos con la persistente y sorprendente diferencia entre Ciencia y no ciencia, siendo la invocación a la observación cuantitativa y el experimento las últimas autoridades.

e) Finalmente, una característica del procedimiento científico tenida en alta estima por algunos de los responsables de los descubrimientos más espectaculares de la física teórica contemporánea, se encuentra en esta afirmación de Einstein: «No hay camino lógico para el descubrimiento de leyes elementales. Solamente existe el camino de la intuición, ayudada por el sentimiento de que debe existir un cierto orden detrás de las apariencias». Sabemos que estos hombres se sumergían completamente en sus problemas y o bien intentaban de manera especulativa postular o inducir un principio del que pudiera derivarse (explicarse) la situación problemática o, de hecho, dejaban que sus procesos mentales maniobraran sin haberles impuesto una dirección consciente. Mientras otros parecían avanzar paso a paso con certidumbre lógica, estos hombres daban sus grandes saltos con precisión, como impulsados por una necesidad que los guiara. A veces revelan que tales soluciones se les ocurren «en un súbito destello» tras estudios largos e incluso febriles.

Este método de solución por postulación inspirada, es cercano al procedimiento defendido por Platón (por ejemplo, en *Phaedon*), y también por ciertos escolásticos, si bien ellos no participaron de nuestro convenio de dejar que la entera validez de tales postulados inducidos dependa en última instancia del veredicto de la experiencia cuantitativa. Se puede defender, como muchos lo hacen, el punto de vista de que fue éste el principal modo de construir de Galileo (cuando postulaba que

la aceleración $\Delta v/\Delta t$ de los cuerpos, en su caída libre es constante, y de ahí deducía consecuencias que podían confirmarse, experimentalmente, en la caída libre y por planos inclinados de los cuerpos). Otro modo de proceder semejante, que es muy común entre los científicos franceses del último siglo, sería desarrollar el trabajo científico en líneas similares a las seguidas por los últimos matemáticos griegos, comenzando por establecer postulados o hipótesis, obteniendo después todos los conceptos que se puedan deducir rigurosa y matemáticamente y por último acudiendo a las confirmaciones experimentales como si fuesen secundarias y fueran meros ejemplos de aplicación. En este tipo de proceder, que en modo alguno ha desaparecido, el experimento real importante se sustituye a veces por el experimento *ideal*, que en esencia podríamos explicar así: «Imaginemos tal o cual situación plausible. Seguramente estaremos de acuerdo en que las cosas sucederán de tal manera, exactamente de acuerdo con mis deducciones». Por tanto, Galileo diría que no necesitaba efectuar realmente un experimento para ver si una piedra soltada desde lo alto de un mástil de un buque en movimiento uniforme llegaría al suelo precisamente al pie del mástil independientemente de cuál fuese la velocidad del buque; él sabe que esto es consecuencia del principio de composición de movimientos ya comprobado anteriormente en el caso del movimiento de un proyectil.

Pero de nuevo, aun siendo verdadero e importante el papel de la formulación de postulados, la aparición no explicada de un principio clave en las mentes excepcionales, por sí mismo no lo dice todo, particularmente en las ciencias físicas experimentales. Mantengamos de momento en el primer plano de nuestra mente todas estas distinguidas opiniones acerca de los requisitos para una investigación fructífera: *percepción intuitiva de las leyes de la Naturaleza, particularmente de sus aspectos cuantitativos, hábito de utilizar al máximo la inteligencia, profundo sentido común, confianza en la observación y el experimento antes y después; y sensibilidad para reconocer una serie de sucesos favorables aunque inesperados*. Revisando estas opiniones, llegamos a la conclusión de que de los propios científicos sólo podemos esperar las sugerencias más generales respecto a sus métodos (¿qué diría un compositor si se le preguntase el método que ha seguido para crear su concierto?); pues en ciencia, como en todo campo de creación, el trabajo se realiza por hombres que se encuentran más allá de la necesidad y del interés de hacer razonable cada uno de sus pasos. En el sentido de que cada problema tiene sus dificultades propias y cada científico sus propios caminos, podemos decir que la investigación científica tiene su arte y métodos propios.

Quizá los cinco aspectos que hemos discutido pudieran resumirse y caracterizarse en una sola expresión, tal como «orientación científica» o «perspectiva científica» o «actitud científica». Aún podemos aventurarnos a decir que, al igual que el trabajo científico no está caracterizado por un método único, en mayor o menor grado *los científicos comparten este complejo de actitudes características* hacia sus ocupaciones. Esto lo demuestra la facilidad con la cual los especialistas en un campo suelen poderse adaptar a otro, a nuevos problemas y a nuevos equipos de

colaboradores; y ayuda a explicar por qué encontramos tan frecuentemente que un gran científico haya hecho contribuciones fundamentales a diversas ramas del saber a veces muy distintas.

14.2 Una secuencia de elementos en la formulación de las leyes

Aunque lo dicho puede hacernos desesperar de encontrar una fórmula fácil, no debemos caer en el escepticismo extremo de Priestley. Desde nuestro modesto punto de vista, podemos analizar cómo surgen las leyes a partir de observaciones, conceptos e hipótesis. Silenciar esto sería despreciar o no tener en cuenta el testimonio de numerosos escritores, verdaderas autoridades en filosofía de la ciencia moderna.

Lo que vamos a analizar es un caso *hipotético* de formulación de una ley, sin decir, con esto, que las formulaciones, *en general*, siguen, realmente, este esquema concreto; pues en verdad el desarrollo de una ley establecida no puede trazarse exactamente ni siquiera en forma retrospectiva. Por tanto, el esquema a tratar y su representación gráfica en la fig. 14.1 no es más que un artificio nemotécnico que puede ayudarnos a pensar inteligentemente sobre la relación entre algunas características recurrentes del método científico, particularmente en la ciencia experimental. Como ejemplo podemos pensar en un caso concreto, quizás una interpretación del descubrimiento de Galileo de las leyes del movimiento de los cuerpos que caen libremente y de los proyectiles.

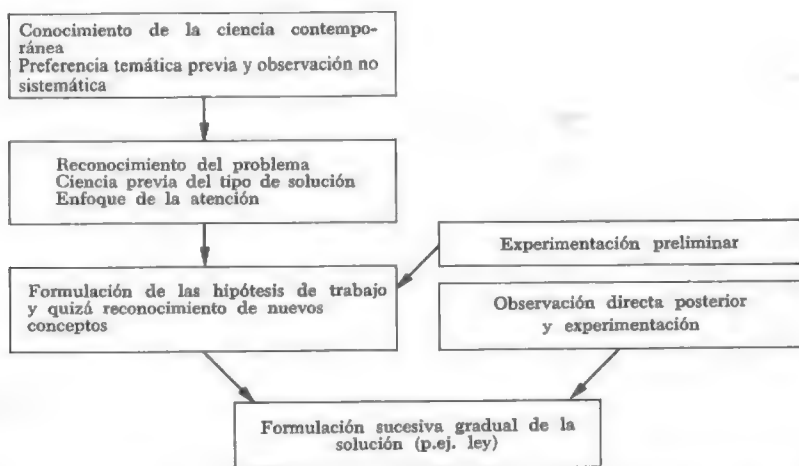


Fig. 14.1 Diagrama nemotécnico de las relaciones existentes entre las características recurrentes en el método científico.

a) Nuestro primer paso debe ser recalcar la importancia que tiene en cualquier investigación, *el conocimiento por parte del investigador de la ciencia contemporánea*, incluyendo los procedimientos e hipótesis, más o menos tácitas, propias de toda empresa intelectual. Así, Galileo disponía para su estudio del movimiento de proyectiles de las anteriores y muy avanzadas investigaciones de Tartaglia y Benedetti. Algunas veces, estos conocimientos previos resultan erróneos y las hipótesis, engañosas. Pero, al principio, los esquemas conceptuales existentes pueden orientar la investigación; constituyen el «sentido común» inicial por el cual el científico debe guiarse o apartarse de él.

En una etapa posterior puede ser que tenga necesidad de volver a sus libros o instrumentos para completar su conocimiento en campos que no le son familiares y que, en cierto modo, tienen relación con el problema que está estudiando. O incluso puede tener que complementar disciplinas ya existentes añadiéndoles instrumentos de medida y ayudas matemáticas inventados para el fin que le ocupa. La inventiva de Galileo (de la cual hemos hablado mucho) se extendió también al campo de las matemáticas. Otros científicos tuvieron que enfrentarse con los mismos problemas. Copérnico tuvo que inventar una gran parte de la geometría del espacio, y Newton su cálculo infinitesimal.

b) Un segundo punto de partida, principalmente en las ciencias experimentales, *es un encuentro de primera mano con la Naturaleza a través de una observación inteligente, incluso antes de que el problema se haya formulado*. No sólo las grandes observaciones «casuales» surgen de esta forma, sino, lo que es mucho más importante, las observaciones proporcionan la materia prima con la que construyen las grandes cuestiones y proporcionan al investigador la medida necesaria de visión no racional y un conocimiento casi intuitivo del comportamiento de la Naturaleza en el campo de su especialidad, las variables que tienen importancia, y su mutua interacción. Para citar, de nuevo, la obra de Einstein (porque es, quizá, la que estuvo lo más alejada posible de la participación personal y de la experimentación) encontramos, en sus notas autobiográficas, esta interesante anotación: «Podría, en verdad, haber adquirido una sólida formación matemática (en el Instituto Politécnico de Zurich). Sin embargo, pasé mucho tiempo en los laboratorios de física, fascinado por el contacto directo con la experiencia».

c) Una vez preparado el marco, *la «situación problemática» puede presentarse a la mente en una «ocasión de reflexión»*, (empleando las felices palabras de John Dewey), que surge tal vez de algún hallazgo casual sorprendente, pero lo más probable es que resulte de una insatisfacción con el grado de consistencia, generalidad o precisión de la explicación corriente o de algún obstáculo en el punto en que se encuentre el nuevo campo de estudio. No existe una clara referencia biográfica de por qué y cómo Galileo comenzó sus estudios del movimiento, pero podemos suponer que sintiéndose insatisfecho con los modos de descripción cualita-

tivos de sus contemporáneos, quiso hallar relaciones cuantitativas en el movimiento. Otros hombres, notablemente el fenomenal experimentalista del siglo XIX, Michael Faraday, parecieron estar motivados más por hipótesis imaginativas y un sentimiento intuitivo de la Naturaleza. Como ejemplo de las evidencias sobre la variabilidad de motivación y temperamento científico, Niels Bohr nos dijo que su histórica teoría sobre la estructura atómica tuvo su origen en el reconocimiento de una semejanza en la *forma* de dos ecuaciones procedentes de campos diferentes de la física.

d) Intimamente conectado con este reconocimiento de la existencia del problema, está la *presciencia del tipo de solución que se espera*, como ya hemos visto. Después del período inicial de admiración, la mente entrenada, pero curiosa, podrá difícilmente evitar sus primeras evasiones, algo vagas, de especulación y anticipación. Sugerirá de un modo natural algunas observaciones y alguna atención a detalles específicos y así apuntará, de un modo general, hacia una respuesta sospechada del problema, aún cuando éste exija un estudio más profundo lejos del estímulo inicial. Por ejemplo, Wilhelm Röntgen, en 1895, dio un gran paso hacia el descubrimiento de los rayos X al observar que una muestra de mineral emitía una luz pálida cuando una corriente eléctrica pasaba a través de un tubo de descarga situado a dos metros de distancia. Rápidamente atribuyó este efecto a la acción de una radiación previamente no sospechada procedente del tubo. Sin embargo, pronto abandonó el problema de la fluorescencia de los minerales por causa de esta nueva radiación (durante veinte años este problema no pudo, siquiera, ser entendido) y, en su lugar, se centró en la cuestión más interesante y fructífera: si los rayos X eran o no una forma de luz invisible.

e) Esta primera etapa de la investigación no sólo puede sugerir nuevos e interesantes problemas y también hipótesis de prueba para la solución del problema, sino igualmente dar lugar a *nuevos conceptos con los cuales analizar la situación problemática*. Volviendo a nuestro caso previo, Röntgen encontró que los objetos son transparentes al paso de los rayos X, pero que esta transparencia disminuía, apreciablemente, cuando se aumentaba el espesor o la densidad del cuerpo. Röntgen pensó que, tomando muestras de distintos metales en las que el producto del espesor por la densidad fuera el mismo, presentarían la misma transparencia. Pero se vio que no era éste el caso; sin embargo, de haber resultado cierta esta sencilla relación, el concepto de «espesor \times densidad», pronto hubiera tenido un nombre determinado y un símbolo para representarlo y, sin duda, habría figurado, notablemente, en la solución del problema de la transparencia de los metales a los rayos X. De igual modo Galileo pudo analizar el problema de la caída en función del concepto «aceleración», definido para el mismo propósito.

Evidentemente, los grandes conceptos, como los grandes problemas sobre los que se edifica la Física, no suelen surgir ya elaborados de las mentes de los científicos individuales. Se desarrollan durante la investigación o bien como en el caso

de conceptos tales como fuerza, energía, etc., llevan tras sí una larga historia de evolución en la que han intervenido muchos hombres y muchos puntos de partida falsos. Aunque imputemos a Galileo la definición de *aceleración*, no debemos olvidar que, en cierto sentido, no hacía más que completar un estudio iniciado siglos antes.

f) Partiendo de la experimentación preliminar inicial y de las primeras ideas directrices, en la mente del investigador puede comenzar a crecer, en un principio, una *hipótesis de trabajo* un tanto modesta —bien sea la decisión preliminar de Röntgen de considerar los rayos X como una forma de luz ultravioleta, o las ideas de Galileo de que las discrepancias en la caída libre de los cuerpos podían considerarse como el efecto secundario del rozamiento del aire.

El proceso de inducción de una hipótesis o postulado a partir de un número limitado de hechos conocidos puede compararse a la experiencia inexplicable que puede ocurrir durante una partida de ajedrez, en que, de repente, «se ve totalmente» el conjunto de piezas en el tablero y la serie de jugadas a realizar para llegar a un final victorioso. Aunque no se conoce bien el mecanismo de estas percepciones repentinas, podemos señalar, en cierta medida, el papel que desempeñan las hipótesis en el esquema de la investigación científica: y es que, sean ellas teóricas o experimentales estimulan una actividad dirigida inteligente. Para dirigir la acción, las hipótesis no tienen por qué ser perfectas —ya hace tiempo que hemos dejado de sorprendernos de que se hayan descubierto tantas teorías correctas siguiendo una hipótesis que, por sí misma, demostró ser errónea. Pero, por esta misma razón, la hipótesis inicial no debía haberse aceptado tan firmemente.

El mismo proceso de inducción es un tanto aleatorio, ya que no existe ninguna necesidad lógica de que deban deducirse las consecuencias previstas. Más sencillamente, el razonamiento suele ser que si el producto de la inducción, una hipótesis —o en su caso una ley— es cierto, se deducirán los hechos *a, b, c,...* Y, si al comprobar estos hechos vemos que responden a la realidad, lo único que podemos decir es que la hipótesis *quizás sea correcta*, pues puede haber otras muchas y mejores hipótesis de las cuales podrían deducirse los mismos hechos. En su libro *The Scientific Outlook*, Bertrand Russell daba un ejemplo algo pintoresco pero estimulante para demostrar otros peligros inherentes en los procesos lógicos, particularmente las limitaciones sobre las confirmaciones experimentales. Él nos dice que imaginemos las siguientes afirmaciones para ser comprobadas: «El pan es una piedra» y «Las piedras son nutritivas». Un silogismo elemental nos dice que en base a tales postulados se deduciría que el pan es nutritivo; como la conclusión puede confirmarse por el experimento de comer pan, ¡podíamos estar tentados a considerar también correctas las premisas! El resultado de la inducción no es nunca único y la deducción puede dar resultado falso si, como aquí, se admiten postulados erróneos.

Igualmente, la ciencia sabiamente nunca pretende explicar los fenómenos con una finalidad absoluta. Los experimentos y teorías puede parecer que tienen éxito

o que fracasan por una variedad, igualmente amplia, de razones falsas. Puede suceder que una hipótesis falsa parezca confirmada por la experiencia, ya sea porque las medidas o su interpretación sean falsas, o porque los errores se hayan compensado unos con otros, o bien que los experimentos sean correctos, pero las hipótesis falsas, excepto para la única predicción que se ha experimentado. Ejemplos de estas combinaciones abundan en la historia de la ciencia. Por otra parte, una hipótesis *válida* puede no llegar a comprobarse por la experiencia, bien sea porque los efectos que de ella se esperan son excesivamente pequeños para detectarse con los instrumentos de que se dispone o bien por la aparición de efectos de origen desconocido que enmascaren la realidad o también pueden haber defectos del método o de la interpretación de la prueba.

Para todo esto no hay ninguna prevención. La complejidad y sutilidad de la Naturaleza puede ser mayor de lo que podemos imaginar o nuestras hipótesis explicar. No existe sustituto de los procesos inciertos del pensamiento ni de la precariedad de la confirmación de hipótesis mediante el ensayo, pero existen varias pautas que han resultado ser muy útiles en la larga historia del pensamiento: Probar, en primer lugar, las hipótesis más sencillas, no considerar que ningún resultado o respuesta sea cierto más allá de toda posible duda, apoyarse en varias comprobaciones independientes antes de aceptar un resultado experimental importante y revalorizar y reformular constantemente conocimientos antiguos a la luz de los nuevos. Aquí vislumbramos, de nuevo, la verdad fundamental de que la ciencia depende de las actividades continuas de generaciones.

Ernst Mach, decía: «Debemos admitir prontamente el hecho de que la ciencia esta inacabada y es variable». Si aceptamos el hecho de que es mejor una hipótesis pobre que ninguna, que nuestras ideas se simplifiquen de un modo excesivamente grosero hasta el punto de que, posteriormente, necesiten una modificación drástica, que puedan coexistir diversas hipótesis, entonces no consideraremos el trabajo de los antepasados como inútil, ni el actual como cierto. Además, si consideramos las hipótesis como estímulos para el trabajo, no les exigiremos que sean inmediata y directamente confirmables. A la larga, desde luego, las hipótesis o postulados conducen a conclusiones comprobables. Incluso aunque el propio Galileo no disponía de instrumentos para comprobar directamente las relaciones correspondientes al movimiento de los cuerpos que caen rápidamente, el enunciado de que su aceleración es constante no dejaba de ser operacional y ha sido comprobado directamente. (Sugerir tal comprobación mediante cámaras de alta velocidad, etc. ¿Es muy directa esta prueba?) Incluso las hipótesis que explican una amplia gama de fenómenos pueden no ser susceptibles de experimentación directa, p. ej., la hipótesis de que el agente mediante el cual el Sol tira de todos los planetas es la misma fuerza gravitatoria que tira de una piedra hacia la Tierra; pero en todo caso insistiremos en su verificación examinando el grado de acuerdo existente entre el hecho observado y la correspondiente predicción deducida de nuestra hipótesis —en el ejemplo anterior, probablemente algunas observaciones astronómicas.

g) Conforme el trabajo avanza, las hipótesis iniciales permiten al investigador *diseñar y llevar a cabo experiencias más definidas y mejor controladas*. Gradualmente, va avanzando la investigación como sobre dos muletas (por un lado la hipótesis que ayuda a interpretar una experiencia y sugiere otras; por otro, los resultados experimentales hacen modificar al investigador las hipótesis de partida en continua interacción). En este sentido, la ley de la caída libre (como expresa su ecuación) es el producto final, el único enunciado que mejor describe todas las características importantes de dicha caída ejecutada por cuerpos grandes o pequeños, aplicada a una piedra o a un pedazo de plomo, cayendo a lo largo de distancias grandes o pequeñas.

14.3 Las limitaciones de las leyes físicas

En un sentido amplio, la palabra «ley» es equívoca. Puesto que se basan en conceptos, hipótesis y experimentos, las leyes no serán más precisas o fidedignas que las expresiones de las definiciones y la precisión y ámbito de los experimentos que las respaldan. Aunque, generalmente, se dice que las leyes de la Naturaleza son inexorables e ineludibles, en parte porque la palabra sugiere analogías con la ley divina, en realidad son generalizaciones formuladas por el hombre y como tales, no son eternamente verdaderas ni inmutables. La afirmación más cierta que podemos hacer sobre las leyes de la ciencia es que, más pronto o más tarde, el avance en los conocimientos y experiencias pondrán limitaciones en su alcance o precisión. Esto está en el papel trágico de la ley misma. Se inducen de un número, necesariamente limitado, de experimentos u observaciones; aunque si han de ser de utilidad, cabe esperar, siempre con precaución, que sean aplicables a todas las situaciones análogas. Tenemos un ejemplo en las extensas tablas compiladas por Galileo para alcances de proyectiles. La base experimental de que disponía debió ser muy limitada, pero una vez que llegó a establecer la forma parabólica de su trayectoria, que es lo esencial en la teoría del movimiento de proyectiles, pudo deducir y aceptar todas sus consecuencias, aunque nunca se hubieran establecido o comprobado experimentalmente. Sin embargo, es preciso una continua vigilancia frente a situaciones en las que esta teoría no será adecuada, no sólo por las idealizaciones que implica, como la hipótesis de que la resistencia del aire es despreciable, sino porque no hay necesidad, lógicamente, de considerar que las leyes para proyectiles a velocidades extraordinariamente elevadas (como en el caso de las partículas atómicas) sean las mismas que las correspondientes a las balas de los cañones, relativamente lentas.

Debemos recordar la advertencia de que todas las generalizaciones, todos los enunciados de leyes físicas, llevan un «texto» oculto —que contiene una explicación del simbolismo, un convenio de cómo manejar las ecuaciones, definiciones de los términos, estipulación de la precisión y alcance de los experimentos que respaldan

la ley, etc. Casi invariablemente, tarde o temprano se encuentra un límite más allá del cual la ley deja de ser válida en la forma que se enunció; por tanto, la advertencia implícita en el «texto» debe evitar la mala aplicación continua de la ley. Podríamos encontrar una analogía en el caso de un grupo de escaladores en lo que se refiere a los límites más allá de los cuales ya no pueden pedir más a sus cuerdas, equipos y a sus propios cuerpos. En ambos casos, los límites *precisos* no suelen estar trazados claramente hasta que algún fallo haga que se les preste atención. Pero, así como los escaladores temen —con razón— estos fallos, los científicos no se desaniman si, ocasionalmente, un nuevo fenómeno no está de acuerdo con las reglas establecidas; porque, más allá de los límites de la ley, puede haber una región, hasta entonces desconocida, de la ciencia (nuevos e importantes conocimientos). Posteriormente, veremos algunas grandes teorías como las de Planck y Bohr que tuvieron su principio en la insuficiencia de las leyes establecidas, en algunas observaciones «inexplicables».

Las leyes de Galileo para el movimiento de proyectiles contienen tal «texto». Encontramos en su obra un cuidadoso estudio de las limitaciones principales que hay que considerar. Por ejemplo, señalaba que la trayectoria dejará de ser parabólica en el caso de alcances muy grandes, pues, entonces, la aceleración, debida a la gravedad, por estar siempre dirigida hacia el centro de la Tierra, ya no tendría la misma dirección en todos los puntos de la trayectoria, como había supuesto al obtener las ecuaciones de la misma. Estrictamente hablando, estas limitaciones se mantienen aún en el caso de trayectorias pequeñas, pero en tal caso son tan poco importantes que podemos despreciarlas para nuestros fines, al igual que ya hemos despreciado el efecto de la resistencia del aire, de la rotación de la Tierra, de la variación del valor de g a lo largo de toda la trayectoria, etc. Ciertamente, no tenemos por qué avergonzarnos de estas limitaciones de nuestras leyes; ya que si tuviéramos que tratar movimientos reales en los que no fueran despreciables estos factores secundarios, podemos confiar en que seguramente seríamos capaces de descubrir las complejas leyes que rigen a dichos efectos menores y añadirlas a nuestros cálculos.

Pero, ¿qué ocurre si una ley falla en algún punto? De ordinario no debemos preocuparnos demasiado, pues, generalmente, es posible rejuvenecer y extender la ley volviendo a definir alguno de los conceptos utilizados. Sin embargo, debemos pagar de otro modo el precio de esta flexibilidad al construir las leyes. La historia de la física muestra casos interesantes en los cuales, al mismo tiempo, a partir aparentemente de la misma serie de experimentos, se idearon dos leyes o teorías diferentes (por ejemplo, la teoría ondulatoria del siglo XIX frente a la teoría corpuscular newtoniana de la luz). Cualquiera de ellas es útil en tanto no se ideen nuevos experimentos que den lugar a respuestas suficientemente dispares para tomar una clara decisión entre las dos teorías rivales. Sin embargo, una vez se ha encontrado tal experimento decisivo —tarea no fácil— y se ha verificado uno u otro (o posiblemente ambos) de los esquemas conceptuales, debe admitirse que es incapaz de explicar la nueva observación.

No obstante, ninguna teoría científica general debe, súbitamente, considerarse como totalmente «falsa», ya que ella continuará siendo tan útil como antes para explicar y predecir todos los experimentos anteriores a aquel decisivo que había incriminado la vieja teoría o ley. Por ejemplo, las leyes de Newton de la mecánica no son «falsas», simplemente, por que no puedan explicar el movimiento de las partículas subatómicas; las leyes de Newton siguen siendo tan válidas como lo fueron en la amplísima gama de experiencias con cuerpos de mayor tamaño. Podríamos establecer la siguiente analogía: Si asociamos los fenómenos que intentamos explicar a los peces de un estanque, la ley o la teoría es la red con que intentamos pescarlos. Puede ser que nuestra red no sea lo suficientemente fina para pescar *toda clase* de peces, grandes y pequeños, pero puede ser suficiente para nuestras necesidades ordinarias. Aún podemos ir más adelante y decir que si nuestros esquemas conceptuales han de ser útiles, *deben* como las redes, tener agujeros; de no ser así (si fuéramos a pescar con grandes cubos en lugar de redes), no seríamos capaces de distinguir entre lo importante y lo trivial, los peces y el resto del estanque.

14.4 El elemento temático en la ciencia*

Existe un tercer elemento en la ciencia al cual nos hemos referido sólo brevemente. Hasta ahora hemos destacado, fuertemente, el papel del «hecho» y del cálculo. Y es cierto que, independientemente de cuáles enunciados científicos «carecen de significado», todas las filosofías de la ciencia están de acuerdo en que estos dos tipos de proposiciones poseen significado y son importantes: las proposiciones referentes a materias empíricas de «hecho» (que en última instancia se reducen a lecturas con un medidor) y las proposiciones que se refieren al cálculo de la lógica y las matemáticas (que, finalmente, se reducen a tautologías). Les llamaremos proposiciones *empíricas y analíticas*, respectivamente, y pensaremos en ellas como si se representaran respectivamente sobre ejes ortogonales x y y ; por tanto podemos representar estas dos «dimensiones» del discurso científico usual por medio de una analogía franca y originar una terminología que será útil en tanto no olvidemos que toda analogía tiene sus límites.

Así podemos utilizar el plano xy para analizar los conceptos de la ciencia (tales como el de fuerza) y sus proposiciones; por ejemplo, una hipótesis (tal como «los rayos X están formados por fotones de alta energía») o una ley general de la ciencia (tal como la ley de la gravitación universal). Los *conceptos* son análogos a puntos del plano xy ; con coordenadas x y y . Las *proposiciones* son análogas a ele-

* Esta sección está adaptada de parte de un artículo de Gerald Holton publicado en *Science and Culture* (editado por G. Holton), Boston, 1965, con autorización de American Academy of Arts and Sciences.

mentos de línea en el mismo plano y tienen componentes proyectadas a lo largo de los ejes x e y .

Como ilustración, consideremos un concepto tal como el de fuerza. Tiene un significado empírico de dimensión x porque las fuerzas se pueden descubrir cualitativamente y también medir cuantitativamente mediante, por ejemplo, la deformación observable de cuerpos sólidos. Y tiene un significado analítico de dimensión y porque las fuerzas obedecen a la matemática del cálculo vectorial (es decir, la ley del paralelogramo de composición de fuerzas) y no a la matemática de las magnitudes escalares.

Consideremos ahora una proposición (hipótesis o ley): La ley de la gravitación universal tiene una dimensión empírica o componente x (por ejemplo, la observación en el experimento de Cavendish en el cual se «ve» que los objetos masivos se «atraen» y se mide este efecto mutuo). Y la ley de la gravitación universal tiene una componente y y analítica, las reglas del álgebra vectorial para la manipulación de las fuerzas en el espacio euclídeo.

Arbitrarios o no, los ejes xy , desde los siglos XVII y XVIII tienen, cada vez más definido, el contenido máximo permitido de la ciencia. El filósofo David Hume, en un famoso pasaje expresa, elocuentemente, que sólo aquello que puede resolverse en función de los ejes x e y es digno de discusión:

«Tomemos en nuestras manos cualquier volumen: de divinidad o metafísica de una escuela, por ejemplo. Preguntemos: ¿Contiene algún razonamiento abstracto respecto a la cantidad o número? No. ¿Contiene algún razonamiento experimental respecto a materia de hechos o criterios? No. Quémalo entonces, pues sólo contiene sofismas.»

Si abandonamos ahora el plano xy , nos alejaremos en una dirección, indudablemente, peligrosa. Pues debemos confesar en seguida que los pensadores rigurosos que tratan de vivir completamente en el plano xy están, frecuentemente, justificados en sus dudas respecto a las apelaciones de la gente de espíritu más abierto (para usar una caracterización hecha por el psicólogo William James). La región, por encima o por debajo de este plano, si es que existe, podía ser muy bien un dominio sensible o fangoso, aunque los nombres de los que, a veces, han seguido esta dirección, sean distinguidos. Como el historiador científico Dijksterhuis decía:

«La aprehensión intuitiva de los mecanismos internos de la Naturaleza, si bien ciertamente fascinante, tiende a ser poco fructífera. Si contienen, realmente, un germen de verdad, éste sólo puede descubrirse por comprobaciones empíricas; la imaginación, que constituye un elemento indispensable de la ciencia, nunca puede ser contemplada sin sospecha.»*

Y, sin embargo, la necesidad de ir más allá del plano xy en la comprensión de la ciencia y, ciertamente, en su elaboración, ha sido solicitada, constantemente, des-

* E. J. Dijksterhuis, *The Mechanization of the World Picture*, Oxford: Clarendon Press, 1961, pág. 304.

de mucho antes de Copérnico, quien decía que la última restricción sobre la elección de las hipótesis científicas no consiste sólo en que éstas deben concordar con las observaciones, sino también en que «deben ser compatibles con ciertas concepciones previas llamadas «axiomas de la física», tales como todo movimiento celeste es circular, todo movimiento celeste es uniforme, etc.* Y si buscamos cuidadosamente, entre los más modernos filósofos y científicos, encontraremos una tendencia a admitir la necesidad y existencia de esta dimensión adicional del trabajo científico. Así, Bertrand Russell citaba casos en los que «las premisas resultaban ser un conjunto de suposiciones previas, ni empíricas ni lógicamente necesarias».**

Podríamos, también, citar y analizar opiniones semejantes de otros científicos y filósofos. Sin embargo, en general, hasta hace poco no ha habido un desarrollo sistemático de este punto. Lo que se necesita podría llamarse análisis temáticos de la ciencia (por analogía con los análisis temáticos usados con grandes ventajas en saberes aparte de la ciencia). Además de la dimensión empírica (x) y la dimensión analítica (y), podemos definir una tercera, o eje z . Esta tercera dimensión es la dimensión de los supuestos previos fundamentales, nociones, términos, juicios metodológicos y decisiones —en resumen, de *themata****—, los cuales ni se desarrollan directamente a partir de, ni se resuelven en, observación objetiva por una parte o en raciocinio lógico, matemático o analítico formal por la otra. Con la adición de la dimensión temática, generalizamos el plano en el cual se analizaron, previamente, los conceptos y enunciados. Ahora se trata de un «espacio» de tres dimensiones utilizando siempre los términos con pleno conocimiento de los límites de la analogía (el cual podría llamarse *espacio de las proposiciones*). Un concepto (tal como la fuerza) o una proposición (tal como la ley de la gravitación universal) ha de considerarse, respectivamente, como un punto o como una configuración (línea) en este espacio tridimensional. Su resolución y proyección es, en principio, posible sobre cada uno de los tres ejes.

Por ejemplo: Las componentes x e y del concepto físico «fuerza» (sus proyecciones en el plano xy) ya se han mencionado. Buscamos ahora la componente temática y encontramos que a través de la historia ha existido siempre en la ciencia un «principio de potencia». No es difícil seguir esto desde el *ἐνέργεια* de Aristóteles, el *anima motrix* neo-platónico, y el activo *vis* que ya se encuentra en los *Principia* de Newton, hasta mediados del siglo XIX, cuando todavía los autores alemanes usan el vocablo «Kraft» en el sentido de energía (Mayer, Helmholtz). En vista de la obstinada preocupación de la mente humana con el tema de lo potente, principio activo, anterior y separado de cualquier ciencia de la dinámica (y también con

* Cita de E. Rosen, *Three Copernican Treatises*, New York: Dover Publications, 1959, página 29.

** *Human Knowledge*, London: Allen y Unwin, 1948, parte 6, cap. 2.

*** Del griego *thema* (tema), plural *themata*.

su opuesto, lo pasivo, principio persistente sobre el que actúa), es difícil imaginar una ciencia en la cual no exista una concepción de la fuerza (y su opuesto, la inercia).

Resulta, también difícil, entender ciertos conflictos. La física escolástica definía la «fuerza» por una proyección en la dimensión fenomenológica que se concentraba en la observación de movimientos terrestres continuos contra un obstáculo que actuaba constantemente; la física de Galileo y Newton definía la fuerza de un modo muy diferente, a saber: por una proyección en la dimensión fenomenológica que se concentraba en un experimento mental como, por ejemplo, el de un objeto que se aceleraba en un plano horizontal sin rozamiento. Las proyecciones por encima de la dimensión analítica difieren también en las dos formas de la física (es decir, atención a las magnitudes en función de las propiedades vectoriales de las fuerzas). Sobre estos dos ejes, los conceptos de fuerza son, completamente, distintos. Sin embargo, los filósofos naturales de los dos campos a principios del siglo XVII pensaron que hablaban de la misma cosa, y la razón era que compartían la necesidad o deseo de incorporar a sus físicas la misma concepción temática del *anima, vis* o *Kraft* (en suma, la fuerza).

Un segundo ejemplo de análisis temático podía ser la forma en que se considera no un concepto, sino una proposición científica general. Consideremos el claro elemento temático de las poderosas leyes de conservación de la física; por ejemplo, la ley de conservación de la cantidad de movimiento, como fue formulada, por vez primera, en forma útil, por Descartes. Según la física de Descartes, como escribía Dijksterhuis:

«Todos los cambios que tienen lugar en la Naturaleza constan de movimientos de... tres clases de partículas. La causa primaria de estos movimientos reside en el *concursus ordinarius* de Dios, el acto continuo de la conservación. Él dirige el movimiento de tal forma, que la *quantitas motus* (cantidad de movimiento) total, es decir, la suma de todos los productos de masa por velocidad, permanece constante.»*

Según el punto de vista de Descartes, esta relación ($\Sigma mv = \text{constante}$) constituye la ley natural suprema. Esta ley —cree Descartes— surge de la invariabilidad de Dios, en virtud de la cual Él concibió un mundo en movimiento con una variación lo más invariable posible.

Desde el siglo XVII hemos aprendido a cambiar el contenido analítico de la ley de conservación —desde una versión escalar a otra más compleja— y hemos, también, extendido la aplicación empírica de esta ley desde el impacto entre cuerpos palpables a otros sucesos. Pero en todo momento hemos tratado de acogernos a ésta y otras leyes de conservación, incluso en un momento en que las observaciones

* *Mechanization of the World Picture*, pág. 410.

parecían hacer difícil su cumplimiento. El matemático francés Henri Poincaré vio, claramente, este papel de las *themata* en su libro *La Science et l'Hypothèse*:

«El principio de conservación de la energía significa, simplemente, que hay algo que permanece constante. Cualesquiera que sean las nociones frescas del mundo que puedan ofrecernos futuros experimentos, estamos seguros —por anticipado de que hay algo que permanece constante y que llamamos *energía*.»*

(A lo cual añadimos ahora: incluso cuando acostumbramos llamarle sólo masa.) El *tema* de conservación ha continuado siendo una guía, incluso cuando el lenguaje ha tenido que cambiar. Ahora no decimos que la ley surge de la «invariabilidad de Dios», sino que, con esa curiosa mezcla de arrogancia y humildad que los científicos han aprendido a utilizar en vez de la terminología teológica, decimos, en su lugar, que la ley de conservación es la expresión física de los elementos de constancia por los cuales la Naturaleza se nos hace comprensible.

La garra que ciertos temas tienen sobre la mente ayuda a explicar la obstinada fe con que tales científicos abrazan una u otra explicación en el caso de que los «hechos» no puedan decidir cuál de las dos es la correcta. La motivación apasionada surge cuando dos científicos mantienen posiciones antitéticas. Por ejemplo, Werner Heisenberg, cuya física fue elaborada sobre el tema del *discontinuo*, discreto, atómico, cuantizado escribía, con relación a la física de Erwin Schrödinger: «Cuando más considero su teoría, más me disgusta.» Y Schrödinger, a su vez, cuya física estaba basada en la idea de *continuidad*, escribía diciendo que el enfoque de Heisenberg le «descorazonaba, si no le repelía».

Una preferencia temática del científico explica también, usualmente, su compromiso con cierto punto de vista que puede, de hecho, ir contra todas las doctrinas aceptadas y contra la clara evidencia de los sentidos. Nadie ha hablado sobre este punto más elocuentemente que Galileo cuando comentaba el hecho de que aceptar la idea de una Tierra móvil suponía vencer la fuerte impresión de que el Sol «se ve», realmente, en movimiento:

«No puedo dejar de admirar la inteligencia de aquellos hombres (dice Salviati en el Tercer Día del *Diálogo sobre los dos grandes sistemas*) que lo han aceptado y defendido (el sistema de Copérnico) como cierto y, con la alegría de su juicio, han violentado de tal modo sus propios sentidos, que han preferido aquello que les dictaba su razón a pesar de que la experiencia sensible les presentaba abiertamente lo contrario... No puedo encontrar límites a mi admiración por Aristarco y Copérnico al aceptar tal violencia en sus sentidos, pues, a pesar de ellos, la razón pudo adueñarse de sus creencias.»

* *Science and Hypothesis*. Traducción inglesa reimpresa por Dover, 1952, pág. 166. Énfasis en el original: *La Science et l'Hypothèse*, Flammarion, Ed. 1929.

Entre los *themata* que se infiltraron en el trabajo de Galileo y ayudaron a la razón a «aceptar tal violencia en sus sentidos», distinguimos, fácilmente, el tema, entonces muy difundido, del mundo real que Dios supervisa desde el centro de Su templo, el tema de la naturaleza matemática; y el tema de que la conducta de las cosas es la consecuencia de sus formas geométricas (por cuya razón Copérnico decía que la Tierra gira «porque» es esférica, y Gilbert, siguiendo la corriente, se dice que llegó a probar, experimentalmente —al menos para su satisfacción propia— que una esfera imanada montada cuidadosamente se mantenía en rotación constante).

Mientras se desarrolla la posición que los *themata* tienen como legítima y necesaria en la búsqueda y comprensión de la ciencia en virtud de la experiencia observada y la construcción lógica, debemos aclarar que no necesitamos decidir ahora la *fuerza* de los *themata*. Nuestra primera intención es, simplemente, comprobar su papel en la ciencia y describir algunos de ellos del mismo modo que un especialista en folklore cataloga las tradiciones y prácticas de un pueblo. No es necesario avanzar más y hacer una asociación de los *themata* con las concepciones siguientes: arquetipos o imágenes platónicas, keplerianos o jungianos; mitos (en el sentido no despectivo, tan raramente utilizado en el lenguaje inglés); conocimientos sintéticos *a priori*, comprensión intuitiva o «razón» de Galileo; realismo, absolutismo o cualquier otra filosofía de la ciencia. Mostrar si tales asociaciones existen o no, es una tarea todavía no realizada. Tampoco pretendemos decir que la ocurrencia de los *themata* es característica exclusiva de la ciencia de los últimos siglos. Por el contrario, vemos el componente temático en acción desde el principio de la historia en las fuentes de las ideas cosmogónicas que posteriormente se encuentran en la *Teogonía* de Hesiodo y en el *Génesis*. Ciertamente, en ninguna parte puede verse la persistencia de grandes cuestiones y la terquedad de ciertos esquemas preseleccionados para definir y resolver problemas mejor que en las especulaciones cosmológicas. Las antiguas hipótesis cosmológicas griegas presentaban un esquema de tres etapas: Al principio, según las palabras de F. M. Cornford, había:

«...una Unidad primaria, un estado de indistinción o fusión en el cual los factores que más tarde llegarían a distinguirse están unidos todos juntos. (2) De entre esta Unidad emergen, por separación, partes de cosas opuestas... Esta separación conduce, finalmente, a la disposición de las grandes masas elementales que constituyen el orden del mundo y la formación de los cuerpos celestes. (3) Los Opuestos interaccionan o se reúnen en fenómenos meteóricos o en la producción de cosas vivas individuales...»*

Es significativo destacar que, cuando trasladamos estas concepciones del nivel animístico al nivel físico, esta fórmula de cosmogonía vuelve a presentarse punto

* F. M. Cornford, *Principium Sapientiae*, London: Cambridge University Press, 1952, capítulo XI.

por punto, en nuestros días, en los campos evolucionistas de la cosmología moderna. Esa reciente teoría de la forma en que el mundo comenzó propone una progresión del Universo que parte de una mezcla de radiación y neutrones en el tiempo $t = 0$; a continuación, una serie de etapas de diferenciación por expansión y desintegración de neutrones; y, finalmente, a la formación de elementos más pesados por procesos de fusión termonuclear, preparando las bases de la formación posterior de moléculas. E incluso la antigua y principal *oposición* a la propia cosmología evolucionaria, a saber: la tradición de Parménides tiene hoy su equivalencia en la teoría del «estado estacionario» de la cosmología.

Así persisten las cuestiones (por ejemplo, respecto a la posibilidad de alguna «materia fundamental» de evolución, de estructura, de infinitos temporales y espaciales). Y las elecciones entre soluciones alternativas de problemas también persisten. Estas continuidades temáticas indican el lado anverso del papel iconoclastico de la ciencia; pues la ciencia, desde su aurora, ha tenido también su creación temática general y su función de aplicación temática. James Clerk Maxwell hace un siglo expresaba esto en un escrito sobre la mecánica molecular:

«La mente del hombre está perpleja frente a muchas cuestiones. ¿Es el espacio infinito y en qué sentido? ¿Es infinito el mundo material y están todas sus partes, igualmente, llenas de materia? ¿Existen los átomos o es la materia infinitamente divisible?»

«La discusión de temas de este tipo ha existido desde que el hombre comenzó a razonar y a cada uno de nosotros, tan pronto como alcanzamos el uso de las facultades mentales, nos surgen las mismas cuestiones, tan nuevas como siempre. Ellas forman una parte esencial de la ciencia del siglo XIX de nuestra era, como lo fue en el siglo V a. de C.»*

Podemos añadir que las cuestiones temáticas no se resuelven y se eliminan. El atomismo del siglo XIX triunfa sobre los vórtices del éter de Kelvin (pero entonces surgen las teorías de campo que tratan las partículas materiales, de nuevo como singularidades, ahora en un continuo del «tipo siglo XX»). La versión moderna de la teoría cosmológica basada en el tema de un ciclo vital (Principio, Evolución y Fin) parece triunfar en el terreno experimental sobre la teoría rival basada en el tema de la Existencia Continua y la tira por la ventana, pero podemos estar seguros de que este tema volverá a entrar por la puerta trasera. Porque en contraposición a las teorías físicas que se materializan en términos del plano xy , los «themata» no pueden aprobarse o desaprobarse. Además, suben y bajan para volver a subir según las mareas de la utilidad contemporánea o la moda intelectual. Ocasionalmente, un

* *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, reimpresso por Dover, 1965, vol. 2, pág. 361.

gran tema desaparece de la vista o un nuevo tema se desarrolla y lucha para establecerse firmemente (al menos durante un tiempo).

La concesión de Maxwell es poco usual, pero no es difícil entender el porqué los científicos sólo hablan rara vez en tales términos. No debemos perder de vista el hecho obvio de que la propia ciencia ha crecido con intensidad porque los científicos han demostrado cómo proyectar su discurso en el plano xy . Éste es el plano de la ciencia pública (S_2) de formulaciones conscientes muy claras. Aquí es fácil de obtener una medida de acuerdo público, de tal modo que los científicos pueden cooperar fructíferamente o estar en desacuerdo entre sí, construir sobre el trabajo de sus predecesores y enseñar, más o menos ambigüamente, el contenido normal y los problemas de aplicación. Todos aquellos campos que pretenden ser científicos tratan de igual modo de proyectar sus conceptos, enunciados y problemas en el plano xy para destacar los aspectos fenomenológico y analítico-heurístico.

Pero está bien claro que, aunque puede haber factorías automáticas funcionando por medio de ordenadores programados y realimentación con elementos sensibles, no pueden existir laboratorios automáticos. La esencia del automatismo es su éxito en el plano xy a expensas de la dirección z (por tanto, los autómatas no hacen, cualitativamente, nuevos descubrimientos). Y, con frecuencia, la esencia del genio científico es exactamente lo contrario (sensibilidad en la dirección z , incluso a expensas del éxito en el plano xy). Pues, aunque la dimensión z nunca está ausente, ni siquiera en la más exacta de las ciencias cultivada por personas reales, se trata de una dirección en la cual la mayor parte de nosotros nos movemos *sin* una formulación explícita o consciente y sin entrenamiento; es la dirección en la cual la materia en cuestión y los medios de comunicación son enteramente distintos de aquellos inventados específicamente para el estudio de las materias en el plano xy , con el cual el científico se siente en casa después de un largo entrenamiento.

Por tanto, es difícil encontrar gente que sea bilingüe en este sentido. No nos sorprende que, para la mayor parte de los científicos contemporáneos, cualquier estudio que trate de salirse, conscientemente, del plano xy no tiene sentido. Sin embargo, es significativo que, incluso en nuestro tiempo, los hombres de genio —tales como Einstein, Bohr, Pauli, Born, Schrödinger, Heisenberg— hayan considerado necesario e importante intentarlo. Para los demás, para el cuerpo principal de científicos, el plano del discurso se ha inclinado progresivamente, o proyectado del espacio xyz al plano xy . (Quizás impulsado por este ejemplo, lo mismo está ocurriendo, cada vez más, en otros campos de la educación.) Los «themata» realmente utilizados en la ciencia se han dejado ahora principalmente implícitos y no explícitos. Pero no son menos importantes. Para entender plenamente el papel que una hipótesis o una ley tiene en el desarrollo de la ciencia, necesitamos considerarla también como una ejemplificación de motivos persistentes, como por ejemplo, el tema de la «constancia» o de la «conservación»; de la cuantificación; de la discreción atómica; de la conducta inherentemente probabilística o —volviendo a Newton— de la interpenetración de los mundos de la teología y de la física.

Hemos hablado, principalmente, de las ciencias físicas. Podíamos, con igual o mayor ventaja, tratar de las ciencias más nuevas que no poseen un cuerpo altamente desarrollado de fenómenos o de cálculos lógicos y estructuras racionales. En tales casos, los elementos z no sólo son relativamente más prominentes, sino que también se estudian con mucha mayor libertad (posiblemente porque en su primera etapa un campo de estudio soporta todavía la abrumadora huella de uno o más hombres de genio). Ellos son, particularmente, aficionados a los «themata», y tienen el coraje necesario para tomar decisiones en los aspectos temáticos.

Debe aclararse que el hecho más significativo, implicado en este ejemplo, es que la mayor parte, o quizás todos estos «themata», no se restringen simplemente a su uso en el contexto científico, sino que parecen proceder del campo menos especializado de nuestra capacidad general imaginativa. Este punto de vista nos lleva en seguida más allá de la usual yuxtaposición de antítesis entre la ciencia y las humanidades. Pues los lamentos sobre la separación entre la ciencia y los otros componentes de nuestra cultura dependen de la simplificación de que la ciencia sólo tiene dimensiones x e y , mientras que el trabajo educativo o artístico lleva consigo decisiones de una clase distinta con elementos predominantes estéticos, cualitativos y míticos. Esta dicotomía, desde nuestro punto de vista, se atenúa mucho (si no se elimina) al observar que también en la ciencia el plano xy no es suficiente, ni nunca lo ha sido.

Seguramente es innecesario observar que, a pesar de la aparición y reaparición de los mismos elementos temáticos en la ciencia y fuera de ésta, no debemos cometer el error de creer que la ciencia y lo que no es ciencia son en el fondo la misma actividad. Hay diferencias que deben considerarse. Como Whitehead dijo una vez sobre la necesidad de tolerar —no dar la bienvenida— las diferencias nacionales: «Los hombres requieren de sus vecinos algo suficientemente *semejante* para ser entendido, algo suficientemente *distinto* para provocar la atención y algo suficientemente *grande* para causar admiración». En este mismo sentido, debemos estar preparados para entender tanto la separación que da identidad al estudio de cada campo como el parentesco que existe entre ellos.

14.5 El contenido de la ciencia; resumen

En este capítulo hemos intentado poner de manifiesto el desarrollo hipotético de una ley física. En capítulos anteriores hemos hablado de la naturaleza de las teorías y conceptos. Ahora estamos en condiciones de resumir los tres elementos principales que constituyen la parte establecida de las ciencias físicas. En este aspecto, por lo menos, existe un acuerdo bastante bueno entre los filósofos contemporáneos de la ciencia, aunque en el detalle y la exposición pueden diferir unos de otros.

En primer lugar, están los *conceptos o expresiones*, como la velocidad, la masa, el elemento químico, etc. (las principales ideas que las ciencias particulares

utilizan como vocabulario). Pueden definirse operacionalmente, es decir, mediante las reglas de correspondencia entre los conceptos por una parte, y lo que puede observarse (preferiblemente medirse) por la otra. Por ejemplo, definimos la velocidad instantánea y la aceleración por medidas específicas y cálculos, operaciones que incluyen distancias, intervalos de tiempo, álgebra simple. Pero estos conceptos tienen también un contenido temático en virtud del compromiso fundamental del científico hacia un punto de vista de la ciencia no sujeto a la comprobación y refutación experimental. En segundo lugar, están las *relaciones entre los conceptos*. Estas relaciones pueden ser simples observaciones de los hechos (por ejemplo, el hielo bajo presión funde por debajo de 0° C: un humilde enunciado que, sin embargo, incluye cuatro conceptos, de los cuales, al menos uno: la temperatura, es mucho más difícil de lo que parece a primera vista). También pueden ser resúmenes generales de hechos, llamados leyes, principios, etc. (por ej. la segunda ley del movimiento de Newton, que relaciona la fuerza resultante que actúa sobre un cuerpo, su masa y su aceleración según la ecuación $F_{\text{res}} = ma$). O también pueden ser sistemas superiores que relacionan leyes entre sí (teorías, que examinamos en el cap. 3). Por último —aun cuando tendemos a darla por supuesta— no debemos olvidar mencionar, al menos, aquella parte de la Ciencia que contiene la *gramática* para expresar, verbal o matemáticamente, definiciones de conceptos y relaciones entre conceptos, es decir, la lógica del propio lenguaje (reglas acerca de cómo utilizar palabras tales como y, o) y la lógica de las matemáticas (cómo utilizar + o -, cómo sumar vectores, etc.).

Estas tres partes de la Ciencia están tan íntimamente relacionadas que una de ellas separada de las otras carece de significado. Una ley física no significa nada sin la definición de los conceptos y las reglas de la matemática o del lenguaje. Un concepto es inútil si no aparece en relación con otros conceptos o si no podemos apoyarlo con definiciones claras. Esto nos ha ayudado a tener una importante visión de cómo crece la Ciencia: Un avance en cualquier parte de la Ciencia se admite provisionalmente hasta que lo absorbe el resto del sistema. Por ejemplo, una nueva ley descubierta puede perturbar las relaciones entre los conceptos aceptados hasta entonces o también la validez de algún concepto antiguo; por tanto, debe transcurrir un cierto tiempo de reajuste hasta que el nuevo descubrimiento sea totalmente incorporado a la estructura total, siempre en crecimiento.

El desarrollo de una ley física o química puede compararse a una corriente de agua en la que puede haber —aparte del frente principal que avanza— remolinos y pequeñas corrientes que retroceden, y también, de cuando en cuando, pueden aparecer repentinas oleadas que se adelanten al avance principal. El proceso de aproximación gradual que lleva hacia una ley puede alargarse varias generaciones. Es de gran provecho para la ciencia que los investigadores individuales no se desanimen por el panorama de esta lucha lenta y encuentren su recompensa en el avance de día a día en su trabajo.

Problemas

Problema 14.1 ¿Qué diferencias fundamentales existen entre una *ley física* (por ejemplo, la ley del movimiento de proyectiles, como se estableció en forma de diversas ecuaciones) por una parte, y por otra una *ley mágica* (por ejemplo, la creencia de los faquires indios de que la ceremonia de manipular las serpientes de cascabel incrementa la probabilidad de una lluvia), una *ley de frenología*, una *ley civil* (por ejemplo, una ley que limita la velocidad en carreteras) y una *ley moral o divina* (los Diez Mandamientos)?

Problema 14.2 En un artículo periodístico reciente, aparecería la siguiente afirmación:

«Pero lo primero que debemos comprender enteramente alrededor de la física son sus extraordinarios rodeos. Parece como si la física comenzara con cuestiones muy correctas, pero desde el principio hay trampas en su exactitud. Por ejemplo, a todo estudiante se le ha dicho que, de acuerdo con Aristóteles, de dos cuerpos que caen libremente, el más pesado lo hace más deprisa; pero que Galileo, arrojando pesos distintos desde la Torre inclinada de Pisa, «demostró» que Aristóteles estaba equivocado, pues los pesos caían exactamente en el mismo tiempo. Y, sin embargo, Aristóteles tenía razón, pues la resistencia del aire frena más a los ligeros que a los pesados. Es verdad que sólo un poco más deprisa, y que la diferencia apenas podrá detectarse; pero ya que los científicos alardean de la precisión con que utilizan las palabras, es natural que tengan en cuenta estas diferencias. Si apremiáramos a un físico sobre una respuesta, fácilmente aceptará que lo que pasa es que los dos cuerpos caerían con igual rapidez *en el vacío*. Al apremiarlo más, también admitiría que nadie ha conseguido nunca un vacío perfecto. Y así resulta que no es el físico, sino Aristóteles, el que nos habla del mundo real en que vivimos.»

Hacer un breve comentario acerca de la corrección o falsedad del *enunciado* y de sus *implicaciones*.

Problema 14.3 ¿Cuáles son las *observaciones escuetas* relativas al Sol, las estrellas, planetas y satélites, etc., de las cuales se dedujo la teoría de la gravitación universal? Tener cuidado en establecer hechos observables y no *suponer* ninguna teoría.

Problema 14.4 Examinar alguna ley, fuera de la física, con la que se esté familiarizado (por ejemplo, una ley lingüística, biológica o económica) y ver si es posible establecer los mismos pasos en su desarrollo lógico por un tipo de análisis como el que hemos seguido para analizar una ley física hipotética.

Problema 14.5 Criticar las siguientes definiciones: a) La masa de un cuerpo es una medida de su cantidad. b) El alcance de un proyectil es la componente horizontal de su desplazamiento. c) La «voledad» de un cuerpo es su volumen dividido por su edad. d) El factor π es, aproximadamente, igual a $22/7$.

Problema 14.6 ¿Qué significan en la ciencia los siguientes enunciados?: a) Los átomos existen. b) El éter no existe. c) La hipótesis de Avogadro (o cualquier otra) es correcta. d) Los descubrimientos no representan verdades absolutas.

Problema 14.7 ¿Por qué acepta usted que la Tierra es redonda? ¿Que la Luna es esférica? ¿Que hubo un científico llamado Isaac Newton? ¿De qué hechos está usted seguro, fuera de toda duda? ¿Por qué?

Problema 14.8 Explicar las razones de porqué la Astronomía es una de las ciencias más antiguas y mejor desarrolladas.

Problema 14.9 Suponer que en sus experimentos Galileo utilizó nuestro equipo más moderno para medir el tiempo y la distancia de los cuerpos que caen libremente. Supongamos que sus datos fueron exactos hasta 10^{-6} s y 10^{-4} cm, respectivamente. Escribir, en pocas frases: a) Cuál podía haber sido el resultado de recopilar una larga serie de datos experimentales. b) Lo que, realmente, hubiera tenido que hacer para descubrir la ley de los cuerpos que caen libremente por medio de tales datos.

Problema 14.10 Escribir un corto ensayo sobre las siguientes materias: a) El científico como investigador creativo. b) La ciencia como un organismo que se desarrolla. c) Factores importantes en el proceso del descubrimiento científico. d) El descubrimiento de verdades por medio del libre y vigoroso intercambio de la inteligencia. e) Los aspectos complementarios de la experiencia: experiencia científica y experiencia poética.

Problema 14.11 Escribir un corto ensayo sobre la extrapolación de Bridgman acerca del punto de vista operacional a campos distintos a las ciencias físicas (sección 12.4).

Problema 14.12 Leer, de nuevo, las dos cuestiones «falaces» de la sección 6.2 y la nota al pie del ejemplo 5 de la sección 8.3. Responderlas de acuerdo con lo expuesto en la sección 12.7.

Problema 14.13 Examinar, críticamente, la analogía citada en los procesos evolucionarios (sección 13.7) y mostrar dónde puede extenderse (por ej., los peligros de la superespecialización) y dónde fracasa.

Textos recomendados para lecturas posteriores

P. W. Bridgman, *The Logic of Modern Physics*, New York: Macmillan, 1927, reimpreso en 1960; capítulos I, II y la primera parte del III.

J. B. Conant, *Science and Common Sense*, New Haven: Yale University Press, 1951, reimpreso en 1961; particularmente capítulos 1-3.

Pierre Duhem, *The Aim and Structure of Physical Theory*, traducido de la segunda edición francesa de 1914 por P. P. Wiener, Princeton, N. J.: Princeton University Press, 1954; Atheneum Books.

P. Frank, *Modern Science and its Philosophy*, Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1949; reimpreso por Collier Books, 1961.

E. C. Kemble, *Physical Science*, capítulo 10.

Ernst Mach, «On the economical nature of physical inquiry», págs. 186-213 de su *Popular Scientific Lectures*, traducido del alemán por T. J. McCormack (conferencia dada en Viena en 1882); LaSalle, Ill.: Open Court Publishing Co., 5ª. edición, 1943.

F. S. C. Northrop, *Logic of the Sciences and the Humanities*, New York: Macmillan, 1947; Meridian Books, en particular capítulos I y II.

Henri Poincaré, *Science and Method*, traducido del francés por F. Maitland, reimpresión por Dover; en particular Libro I, capítulos 1 y 3.

K. Popper, *Conjectures and Refutations*, New York: Basic Books, 1962; en particular capítulos 1-3.

Project Physics Reader, vol. 1, artículos de Feynman, Hoyle, Bridgman y Polya.

G. Sarton, *The Study of the History of Science*, Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1936; reimpresión de Dover hasta la pág. 52.

S. Toulmin, «The evolutionary development of natural science», *American Scientist*, vol. 55, págs: 456-471 (1967).

Fuentes, interpretaciones y trabajos de referencia

W. I. B. Beveridge, *The Art of Scientific Investigation*, New York: W. W. Norton, 1950.

P. M. Blake, C. J. Ducasse, y E. H. Madden, *Theories of Scientific Method*, Seattle, Wash.: University of Washington Press, 1960.

B. Brody y N. Capaldi (editores), *Science: Men, Methods, Goals*, New York: Benjamin, 1968.

N. R. Campbell, *Physics, the Elements*, London: Cambridge University Press, 1920; reimpresso con el título *Foundations of Science* Por Dover Publications.

R. Carnap, *Philosophical Foundations of Physicas*, New York: Basic Books, 1966.

A. C. Crombie, *Medieval and Early Modern Science*. Garden City, N. Y.: Doubleday Anchor Books, 1959, vol. II, págs. 1-35, 285-333

H. Feigl y W. Sellars, *Readings in Philosophical Analysis*, New York: Appleton-Century-Crofts, 1949; en particular las págs. 498-514.

N. R. Hanson, *Patterns of Discovery*, New York: Cambridge University Press, 1958.

G. Holton, «The thematic imagination in science», págs. 88-108 en *Science and Culture* (editado por G. Holton), Boston: Beacon Press, 1965.

G. Holton, *The Thematic Origins of Scientific Thought: Kepler to Einstein*, Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1973.

D. Johnson, «Mysterious craters of the Carolina coast», *American Scientist*, enero de 1944. Un ejercicio sobre «métodos científicos».

T. S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago: University of Chicago Press, 2ª. edición, 1970.

L. Laudans, «Theories of scientific method from Plato to Mach», *History of Science*, vol. 7, págs. 1-63 (1969).

K. R. Popper, *The Logic of Scientific Discovery*, traducido de la edición alemana de 1934, London: Hutchinson, 1959; New York: Science Editions, 1961.

B. Russell, *Scientific Outlook*, New York: W. W. Norton, 1931; capítulos II y III.

H. Shapley y otros, *Readings in the Physical Sciences*, New York: Appleton-Century-Crofts, 1948, págs. 401-423.

S. Toulmin, *Human Understanding*, vol. 1, Princeton, N. J.: Princeton University Press, 1972.

J. Ziman, *Public Human Knowledge, an Essay Concerning the Social Dimension of Science*, New York: Cambridge University Press, 1968.

Parte E

Las leyes de conservación

15

**Ley de conservación de
la masa**

16

**Ley de conservación de la
cantidad de movimiento**

17

**Ley de conservación de
la energía**

18

**Ley de disipación de la ener-
gía**

Las leyes de conservación

Si reflexionamos acerca del edificio científico que hemos levantado hasta este momento, quizá comprenderemos como el gran éxito en pos de conocimientos científicos es atributo de nuestra aptitud para llevar a cabo tres tareas íntimamente relacionadas: aislar el fenómeno de efectos que puedan distraer o que sean triviales,



describir de un modo preciso lo que sucede, y descubrir alguna característica específica que permanezca constante en el curso de los sucesos que observamos. Estos son los principios de toda actividad científica, y exactamente estas tres funciones se resumen de la manera más eficaz en las distintas leyes de conservación. Estas leyes, quizá las herramientas más poderosas, ciertamente las más apreciadas, de análisis en física, establecen, en esencia, que independientemente de lo que suceda en detalle a un sistema de cuerpos en interacción, existen ciertas magnitudes mensurables (la masa total, o la cantidad de movimiento total, o la energía total, o la carga) que permanecen *constantes* a lo largo de todo el período de observación cuando se dan ciertas condiciones.

Existe una gran belleza en estas leyes. Se abren paso entre el alboroto y confusión de las apariencias y señalan una constancia fundamental de un modo tan convincente, que el suceso cambia de golpe desde el caos a un orden obligado. Además, son tan simples, generales y poderosas que, por la gran amplitud de su aplicación, las leyes de conservación unifican las distintas ramas de la Física dándoles coherencia a cada una de ellas y haciéndolas coherentes con las demás. En realidad, suelen denominarse *principios* en vez de *leyes*, terminología que revela que no han de considerarse como meros resúmenes de hechos experimentales, sino que han llegado a ser puntos de partida del propio conocimiento científico.

En la parte E estudiaremos concretamente las leyes de conservación de la masa, de la cantidad de movimiento y de la energía.* Esta parte servirá también de puente lógico e histórico entre el estudio de la gravitación universal y los siguientes capítulos sobre la teoría atómica.

* La ley de conservación de la carga eléctrica la consideraremos en el capítulo 24.

Capítulo 15

Ley de conservación de la masa

15.1 Preludio a la ley de conservación

En su gran obra *De rerum natura* «Sobre la naturaleza de las cosas», el poeta romano Lucrecio, contemporáneo de Julio César y Cicerón, recordaba y embellecía la filosofía natural de los griegos Leucipo, Demócrito (ambos c. 450 a. de C.) y Epicuro (c 300 a. de C.) y reiteraba lo que puede considerarse como uno de los primeros indicios de un profundo principio general de la ciencia: «Las cosas no pueden surgir de la nada, y, si han surgido, no pueden volver a la nada.» Todo lo que ahora existe debe tener existencia continua en el pasado, presente y futuro, aunque hayan podido sufrir cambios su forma, apariencia y cosas semejantes.

Sin embargo, hay una distancia considerable entre el panegírico de Lucrecio y la moderna ley de conservación de la masa —una base casi axiomática de gran parte de nuestra ciencia— que establece que, a pesar de los cambios de posición, forma, aspecto, composición química, etc., *la cantidad total de masa contenida en una determinada región, permanece constante*. Es inútil buscar entre los escritos antiguos algún parentesco con este principio científico (excepto, quizás, en algunos tratados de astronomía). El fin último de Lucrecio, por ejemplo, no era presentar una prueba científica, sino aliviar a sus contemporáneos del peso de supersticiones y temores con una exposición de la filosofía epicúrea y una explicación racional de los fenómenos naturales. Aunque documentaba su tesis con agudas observaciones sobre la Naturaleza, su interés no era, principalmente, el problema físico, sino la exposición de una filosofía determinada, a saber: la base de un tipo particular de ateísmo. Esto se pone de manifiesto en una de las primeras páginas de la obra *De rerum natura*:*

* De la traducción de Rolfe Humphries, *The Way Things Are* (Bloomington: Indiana University Press, 1968), pág. 24.

«Nuestro punto de partida será este principio:

Nada ha nacido de la nada

Por la voluntad de Dios. ¡Ah!, pero las mentes de los hombres están asustadas,

Porque ellos ven, en la Tierra y en el Cielo,

Muchos sucesos cuyas causas les resultan

Imposibles de explicar; así, ellos suponen

Que la razón está en la voluntad de Dios. Como para nosotros,

Una vez hemos visto que *Nada procede de la nada*,

Percibiremos con mayor claridad

Qué estamos buscando, de dónde viene cada cosa,

Cómo se originan las cosas y no 'la voluntad de los dioses'».

15.2 Etapas hacia una formulación

Antes de que pudiera formularse la ley de conservación de la masa (que abreviaremos con la notación LCM) y apareciese en forma significativa en la ciencia moderna, se desarrollaron tres conceptos, cada uno de los cuales supone el trabajo del mayor científico de su tiempo. Primero surgió el concepto de sistema idealmente aislado. Entre los griegos y escolásticos, la idea dominante era la de un Universo totalmente integrado y unificado. En este esquema, el comportamiento de un simple objeto estaba determinado por su relación con el resto del cosmos, por el papel que necesariamente le correspondía en el drama total. Por tanto, carecía de sentido pensar en sucesos aislados, por ejemplo, interpretar el comportamiento de un objeto mediante una ley física aplicable a tal región particular y que aquél no estuviera influido por sucesos que ocurrieran simultáneamente en el universo que rodea a dicha región.

Con Alfred North Whitehead podemos considerar el concepto del sistema aislado en parte como una consecuencia del trabajo de Galileo acerca del movimiento de los cuerpos. Concretamente, la presciencia de Galileo de la ley de la inercia o, como decimos ahora, la primera ley del movimiento de Newton, habla del movimiento continuo, uniforme y no acelerado de cualquier objeto en un plano horizontal en ausencia de fuerzas externas; y así nos invita a rastrear mentalmente una región que contiene sólo el cuerpo en equilibrio, una región en cuyos límites se rompen todas las conexiones causales con los fenómenos del exterior.

Suponiendo, entonces, que se disponía del concepto de un *sistema aislado* o *cerrado* con el que se define la región que nos ocupa, se necesitaba a continuación un criterio para medir la cantidad de materia antes de que pudiera formularse una ley de conservación. Y tal criterio lo daba Newton en el primer párrafo de sus *Principia* donde, al hablar del término «cantidad de materia», dice: «Es la cantidad que de ahora en adelante llamaré cuerpo o *masa*». Para conocer cuantitativamente la

cantidad de materia de un sistema sólo necesitamos conocer su inercia (o bien su peso, «ya que es proporcional al peso, según he hallado experimentalmente...»). Con esta definición en mente era inevitable darse cuenta de que hay algo duradero y constante en todo objeto dado —no necesariamente su color o tamaño aparente, su posición o movimiento, su volumen o forma, ni tampoco su integridad, sino su masa en cualquier lugar y por tanto también su peso en una localidad dada.

Se hacía claramente necesaria una tercera contribución, cual es la prueba de que la cantidad de materia en un sistema dado o, prácticamente hablando, el peso de la materia contenida en una botella cerrada, no cambia durante las transformaciones químicas. El historiador de la Ciencia Charles Singer* creía que la prueba explícita de Newton sobre la constancia de peso en el mismo lugar «dio un ímpetu especial a la racionalización de la química» al revelar una simple y afectiva piedra de toque para la comprobación de los cambios cuantitativos.

Para nosotros resulta más simple proceder a una prueba directa de la largo tiempo sospechada LCM: Introducimos cierta cantidad de aire y un trozo de madera en una botella cerrada y enfocamos los rayos del Sol sobre la madera hasta que arda. Después de su transformación, las cenizas y los gases remanentes conjuntamente no pesan más ni menos que los componentes originales del sistema. Sin embargo, transcurrieron unos cien años entre los *Principia* de Newton y el trabajo que proporcionó este tipo de prueba final y explícita, las memorias sobre la calcinación y el texto *Traité Élémentaire de Chimie* («Elementos de Química») de Antonio Laurent Lavoisier (1743-1794), llamado, frecuentemente, el padre de la química moderna (fig. 15.1).

15.3 Prueba experimental de Lavoisier

Los obstáculos que hubieron de vencerse en el intervalo comprendido entre Newton y Lavoisier pueden parecer ahora casi triviales. Lavoisier fue uno de los primeros en demostrar, concluyentemente, que la más familiar de todas las transformaciones químicas, la combustión de la materia, es, generalmente, oxidación, es decir: la combinación de la sustancia con aquella parte del aire ambiente a la que dio el nombre de *oxígeno*; y que, por tanto, el gas tomado de la atmósfera, debía tenerse en cuenta en el cálculo global. Antes de Lavoisier, ni la naturaleza de los gases ni el proceso de la combustión se conocían con claridad; existían pocas posibilidades de trabajar con cantidades cuidadosamente medidas de gases e, incluso, de realizar las reacciones en vasijas cerradas aisladas del resto del universo químico. En lugar de una ley general de conservación de toda la materia participante en los procesos químicos existía en la mente científica el concepto confuso y obstinado

* Charles Singer, *A Short History of Science*, Oxford: Clarendon Press (1941).



Fig. 15.1 Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794).

de que en la combustión en medio abierto, algunas sustancias, como la madera, perdían peso (porque, como ahora diríamos, se emitían más gases que se absorbían por oxidación), mientras que otros, como el fósforo, ganaban peso (en términos modernos, absorbían más oxígeno que los gases emitidos). Durante el tipo inverso de reacción —ahora denominado *reducción*—, en el cual se cede oxígeno, podían ocurrir una variedad semejante de cambios.

Puesto que las teorías científicas tienden, de un modo directo y natural, a tratar, inicialmente, con conceptos derivados de los aspectos más conspicuos de los fenómenos, se comprende la existencia, en el siglo XVIII, de un esquema conceptual que intentó explicar un gran número de diversas observaciones de la combustión, incluyendo el cambio de la estructura física y la naturaleza química del objeto que se quema, la presencia del calor y de las llamas, los cambios cualitativos del aire ambiente e, incluso, los diversos cambios de peso. Para estos propósitos se inventó el *flogisto*, sustancia o «principio», cuya migración, hacia dentro o hacia fuera de

los cuerpos que se transforman, explicaría tales observaciones.* La teoría del flogisto murió una década después del ataque de Lavoisier, no sólo porque el concepto del flogisto había intentado explicar tal número de fenómenos que fracasó en alcanzar un foco cuantitativo y llegó a ser contradictoria en sí misma, sino también porque Lavoisier demostró que el concepto era innecesario y, por la incontrovertible evidencia de la balanza, demostró también que derivando la atención a la cantidad total de materia que experimenta una reacción química (incluyendo los gases y los vapores), se obtenía la recompensa de una ley rigurosa de conservación de la materia.

Unos pocos extractos del texto de Lavoisier de 1789 demuestran algo de su método a este respecto y dan idea de la novedad relativa de este argumento cuantitativo:

«Es bien conocido el elegante experimento de Mr. Ingenhouz, sobre la combustión del hierro (sigue ahora una descripción del experimento en que se realiza la combustión de un alambre de hierro dentro de una vasija en la que hay aire enriquecido de oxígeno). Como Mr. Ingenhouz ha visto que no se produce cambio (en peso) ni en el hierro ni en el aire, en este proceso, he repetido el experimento en diferentes circunstancias, en un aparato adaptado para poner de manifiesto mi teoría... (sigue ahora la modificación introducida que permite una determinación exacta de los pesos). Si la experiencia se ha realizado bien, de 100 granos de hierro (5,3 g) se obtendrán 135 ó 136 granos de etiope (óxido de hierro), lo cual supone un aumento (de masa o peso) del 35 %. Si se presta toda la atención que merece a este experimento, se observará que el aire ha disminuido en peso precisamente lo que ha ganado el hierro. Si hemos quemado 100 granos de hierro y ha aumentado su peso en 35 granos, se encontrará que el aire ha disminuido exactamente en 70 pulgadas cúbicas: Y es bien conocido que el peso del aire vital (oxígeno) es casi exactamente de medio grano por pulgada cúbica; así que el aumento de peso en uno coincide exactamente con la pérdida del otro.»

Docenas de tales experimentos se describen por Lavoisier incluyendo todos los tipos de reacciones entonces conocidas y siempre repitiendo esta lección: En las reacciones que ocurren dentro de un recinto cerrado la ganancia experimentada por cualquier parte del sistema está contrarrestada por la pérdida del resto del mismo, es decir, *la cantidad total de materia dentro del sistema permanece constante*.

El esquema conceptual de la combustión y de la reducción de Lavoisier fue superior a la teoría del flogisto en la forma, en la certidumbre y en la elegancia de

* Para un relato completo véase J. B. Conant, *Science and Common Sense*, New Haven: Yale University Press (1951) cap. 7; también *The Overthrow of the Phlogiston Theory*, Caso 2 en el *Harvard Case Histories in Experimental Science* (editado por J. B. Conant), Cambridge: Harvard University Press (1950).

las predicciones numéricas y resultó, por tanto, mucho más favorable al progreso científico, a pesar del hecho de que muchas observaciones (por ejemplo, la presencia de las llamas o el cambio de apariencia del material) quedaron fuera del esquema de las explicaciones inmediatas. Un proceso algo semejante de sucesos caracterizó a diversas revoluciones conceptuales de la ciencia, como, por ejemplo, ocurrió con la invención y caída de la teoría del *calórico*, que trataremos, con cierta extensión, en el capítulo 17.

No hace falta decir que, una vez resueltos los problemas de la combustión y de la composición del aire, el proceso de oxidación tomó su lugar como un caso particular, aunque, a veces, espectacular, de las reacciones químicas, todas las cuales exhiben la ley de conservación como proposición general y básica. Como Lavoisier escribió en 1789:

«Debemos considerar como un axioma incontestable que en todas las operaciones del Arte y la Naturaleza, nada se crea; la misma cantidad de materia existe antes y después de un experimento... y no ocurren más que cambios y modificaciones en la combinación de estos elementos. Todo el arte de realizar experimentos químicos, depende de este principio: Debemos (para citar una aplicación de este principio) suponer siempre una exacta igualdad entre los elementos del cuerpo examinado y aquellos resultantes del producto de su análisis.»

15.4 ¿Se conserva, realmente, la masa?

A pesar del enunciado enfático de la ley de conservación de Lavoisier, todavía quedaba lugar para la duda. Un moderno químico experimental, examinando los informes de Lavoisier de sus experimentos con cierta apreciación del grado de precisión que aquél pudo obtener con sus aparatos, estaría escéptico frente a la afirmación de que «el aumento de peso de uno coincide *exactamente* con la pérdida del otro». Sin embargo, la ley era plausible y, por tanto, la mayor parte de los químicos del siglo XIX estaban de acuerdo con Lavoisier y la aceptaron como un axioma hasta que se presentó alguna razón definida para sospechar que la masa no se conservaba. En tanto se pensó que la ley de conservación de la masa era compatible con otros aspectos aceptados de la naturaleza de la materia, y en tanto no se observó una violación evidente, no existió incentivo alguno para emprender otros ensayos experimentales.

En 1872, el químico alemán Lothar Meyer (1830-1895) sugirió que el reajuste de átomos durante las reacciones químicas podía venir acompañado de la absorción o emisión de partículas de «éter», la sustancia que se creía responsable de transmitir las ondas luminosas. Tales partículas podían abandonar o entrar en el sistema aunque estuviese aislado frente a los intercambios de materia. En aquel tiempo la existencia real de dichas partículas era todavía una cuestión abierta. Si existían, la

masa del sistema cambiaría en una pequeña cantidad, de acuerdo con la masa de estas partículas y del número cedido o absorbido.

Si bien la mayor parte de los químicos pensaba que los experimentos de Lavoisier y otros habían establecido la validez de la ley de conservación de la masa para las reacciones químicas, no demostraron interés en comprobarlo experimentalmente con la máxima precisión. Las dudas expresadas por Lothar Meyer no podían despreciarse sin considerarlas debidamente, ya que Meyer había establecido ya su reputación como un químico de vanguardia. Otro químico, Hans Landolt, decidió que eran necesarias más pruebas experimentales y realizó una extensa investigación durante las dos décadas que siguieron a 1890, realizando medidas muy precisas de las masas de sistemas que experimentaban reacciones químicas. En 1909 estableció su conclusión:

«El resultado final de la investigación es que no puede hallarse ningún cambio del peso total en ninguna reacción química... La comprobación experimental de la ley de conservación de la masa puede considerarse completa. Si existe alguna desviación, será menor de una milésima de miligramo.»

El resultado de Landolt es típico de los datos experimentales de las ciencias físicas: No es posible decir que se ha probado que una diferencia u otra medida es *exactamente* cero (o exactamente cualquier otro número). Sólo puede decirse que el experimento muestra que el resultado es cero dentro de un margen específico de error. (Naturalmente, es conveniente suponer a efectos teóricos que se ha establecido el valor exacto.)

Si no hubiera otra evidencia valedera para nosotros que los experimentos sobre sistemas que reaccionan químicamente, llegaríamos a la conclusión, incluso hoy, de que la ley de conservación de la masa es correcta. Un químico moderno que repitiera el experimento de Landolt con el mejor equipo disponible obtendría la misma conclusión, incluso aunque su margen de error fuera más pequeño.

Sin embargo, sabemos ahora que existen otros tipos de experimentos en los cuales *cambia* la masa del sistema. Los casos más importantes son aquellos que incluyen reacciones de núcleos o partículas elementales, tales como la desintegración radiactiva, la fisión o la fusión (véase cap. 30). En algunas reacciones, como la aniquilación de electrones y positrones o protones y antiprotones, la masa de las *partículas materiales (la masa en reposo)* desaparece por completo. Por otra parte, la masa de un objeto puede incrementarse considerablemente cuando se acelera a velocidades próximas a las de la luz.

En todos estos casos, el cambio aparente de masa viene equilibrado por un cambio correspondiente de energía de acuerdo con la teoría de la relatividad de Einstein (cap. 30). Esto podría interpretarse diciendo que la propia energía tiene masa. La teoría de Einstein predice que, incluso en las reacciones químicas, debe producirse un cambio muy pequeño de la masa en reposo. Este cambio es debido al hecho de que en la reacción se absorbe o se produce energía calorífica y que tal energía posee masa. Sin embargo, ninguna reacción química da lugar a un cambio de

masa suficientemente grande para que pueda medirse. En las reacciones estudiadas por Landolt, el cambio de masa en reposo previsto por la teoría de la relatividad es muy inferior a la milésima de miligramo. La conclusión de Landolt de que la ley de conservación de la masa es válida para la materia en reposo es errónea, a pesar de que sus datos experimentales son tan buenos como los mejores que se hayan jamás obtenido.

Aquí tenemos, ciertamente, el testimonio sorprendente de la potencia de una teoría para destronar una ley justamente cuando parecía firmemente establecida por la experiencia. En el cap. 30 veremos detalladamente cómo ocurre esto y cómo llega a restaurarse, en una nueva forma, la ley de conservación de la masa.

Problemas

Problema 15.1 Leer el capítulo 7 del libro de Conant, *Science and Common Sense*, y estudiar tres reacciones químicas (p. ej., la combustión del carbón, calcinación de un metal y reducción de un mineral metálico), intentando de explicarlas por la hipótesis del flogisto y por la moderna hipótesis del oxígeno.

Problema 15.2 Leer las páginas 399 a 408 de *Readings in the Physical Sciences*, de H. Shapley, H. Wright y S. Rapport (New York: Appleton-Century-Crofts, 1948); estudiar luego el procedimiento experimental de Lavoisier, con referencia especial al uso que hace del principio de conservación de la masa.

Problema 15.3 Leer, en los *Elementos de Química*, de Lavoisier, el prefacio del autor y los capítulos III, V y VII; estudiar, después, tres de las reacciones químicas en las cuales se demuestra claramente el principio de conservación de la masa.

Textos recomendados para lecturas posteriores

R. Feynman, *The Character of Physical Law*, London: British Broadcasting Corporation, 1965; reimpresso por MIT Press; capítulo 3.

Fuentes, interpretaciones y trabajos de referencia

Ida Freund, *The Study of Chemical Composition, an Account of its Method and Historical Development*, reimpresión de la edición de 1904, por Dover, capítulos II y III.

P. Pomper, «Lomonosov and the discovery of the law of conservation of matter in chemical transformations», *Ambix*, vol. 10, págs. 119-127 (1962).

J. Smedslund, «The acquisition of conservation of substance and weight in children: I. Introduction», *Scandinavian Journal of Psychology*, vol. 2, págs. 11-20, 85-87 (1961), reimpreso en *Readings in Child Behavior and Development* (C. B. Stendler, editor), New York: Harcourt, Brace and World, 2.^a edición, 1964.

VIOLATED

Capítulo 16

Ley de conservación de la cantidad de movimiento

16.1 Introducción

Aunque ya se ha hecho todo lo necesario para describir el movimiento de los cuerpos con precisión, para analizar las trayectorias de los proyectiles y los planetas y para especificar las fuerzas necesarias que explican estos movimientos, queda aún algo que parece no estar de acuerdo con el sentido común. Así, mientras cualquiera puede ver intuitivamente que un cuerpo se mueve cuando de un modo u otro un agente en contacto directo lo empuja o tira de él, no está muy claro por qué un cuerpo continúa en movimiento en ausencia de fuerzas resultantes o de cualquier agente material en inmediato contacto con él. El origen de esta dificultad no es difícil de encontrarlo; todos hemos aprendido en la escuela que, para acercar o alejar un cuerpo de nosotros, es preciso que realicemos algún esfuerzo, y que para mantener en movimiento los cuerpos que nos rodean es preciso algún agente que actúe sobre ellos. Nuestros conceptos intuitivos están fuertemente influidos por estas sensaciones.

Para los griegos y escolásticos aristotélico-tomistas de la Edad Media, la afirmación de que no es necesaria una fuerza ni agente externo para mantener un cuerpo en movimiento con velocidad constante y en línea recta, hubiera parecido absurda. E incluso el movimiento no uniforme de avance de una flecha o una bala sólo era explicable por la perturbación continua del aire de su alrededor que comenzaba o se originaba en el momento de su lanzamiento. Su máxima era: Todo lo que se mueve debe ser movido por la acción de algún otro agente. Hasta los días de Galileo y Newton el movimiento uniforme sin una causa persistente y continua no fue, generalmente, concebible. Tan arraigada estaba esta creencia, que ni Newton pudo librarse en su Universo físico de la necesidad de asociar continuamente una causa a todos los fenómenos. Por supuesto que él ya no consideraba el movi-

miento de los planetas como el resultado de una incesante actividad de Dios y sus ángeles; pero en su filosofía del Cosmos, aún consideraba estos movimientos como procedentes de la Deidad, en virtud de, por así decirlo, su continua —aunque pasiva— atención y conocimiento del futuro.

El intento de liberar la idea del movimiento y de estudiarlo como un fenómeno independiente se remonta, en realidad, al fraile franciscano del siglo XIV, William Ockham († 1347). La universidad de París, donde él enseñó, llegó a ser un centro de estudios sobre mecánica durante la alta Edad Media y, aunque representaba una opinión minoritaria en su tiempo, influyó, posteriormente, de modo muy intenso sobre hombres como Leonardo de Vinci y el propio Galileo. La contribución de Ockham ha sido sucintamente descrita por Sir Edmund Whittaker en la obra *From Euclid to Eddington* (pág. 66):

«En el ejemplo de la flecha él propuso explicar los fenómenos sin depender de la propulsión del aire, suponiendo que a lo largo de su vuelo la flecha transportaba una cierta «carga» no material, por decirlo así (correspondiente a la noción moderna de cantidad de movimiento), cuya posesión aseguraba la continuidad de su progreso. Esto puede considerarse como la primera aparición en la historia de cualquier principio dinámico importante; y, teniendo en cuenta sus innovaciones filosóficas, se justifica el considerar a Ockham como el principal fundador de la ciencia moderna. Su idea fue defendida posteriormente por su discípulo Jean Buridan, quien llegó a ser rector de la universidad de París, en 1327, y aseguró que la «carga» en cuestión era proporcional al producto del peso del proyectil por alguna función de su velocidad (no distinguía entre los conceptos que hoy llamamos cantidad de movimiento y energía cinética). Sus doctrinas fueron aceptadas sin modificación y, ciertamente, con algún deterioro por sucesores menos capaces; sin embargo, llegaron hasta Galileo, Descartes y otros físicos del siglo XVII, quienes acertaron en definir con precisión la cantidad de movimiento...»

Examinando superficialmente, parece que la propia sugerencia de William Ockham no supone progreso, sino una marcha atrás hacia al animismo. Él y sus discípulos sugieren que durante el establecimiento del movimiento algo (no importa si le llamaron ímpetu o cantidad de movimiento) se imparte al cuerpo; y cuando esta magnitud crece o disminuye, ocurre lo mismo con el propio movimiento. Pero, evidentemente, este punto de vista que relaciona el movimiento con la concreción de la materia ayuda a concentrar la atención sobre el propio objeto móvil; y cuando —por fin— se convino en medir esta «carga» por el producto de la masa m por la velocidad instantánea v del objeto, el elemento descriptivo perdió importancia. Se podía comenzar a pensar en el movimiento en abstracto y, particularmente, a través del vacío. Podía también dejarse a un lado la pregunta: «¿qué es lo que mantiene un cuerpo en movimiento si no es una tracción o impulso externo constante?», y atender a esta otra más provechosa: «Si postulamos que un cuerpo móvil

tiene en cada instante una cantidad de movimiento mv , ¿cómo cambia esta magnitud bajo diversas condiciones?». Así, las preguntas originales acerca del movimiento podían responderse, finalmente, en función de la ley de la inercia, según la cual un cuerpo aislado persiste en un estado de velocidad constante y, en consecuencia, de cantidad de movimiento constante, o también en función de la segunda ley de Newton, que permite calcular el efecto de las fuerzas externas sobre el movimiento y, por tanto, sobre la cantidad de movimiento. Así, la mente científica de aquel tiempo resolvió un problema esencialmente estéril, replantéandolo desde un punto de vista completamente diferente; e históricamente esto constituyó uno de los métodos más poderosos hacia el progreso de la ciencia.*

16.2 Definición de cantidad de movimiento

El desarrollo histórico que se extendió desde la primera concepción de la cantidad de movimiento en el siglo XIV hasta el punto que, realmente, nos interesa ahora, cual es la ley de conservación de la cantidad de movimiento, duró casi cuatrocientos años, y llevó consigo una infinidad de brillantes investigaciones. No merece la pena examinar los complejos detalles; en su lugar, mencionaremos sólo las etapas finales del establecimiento de la ley.

En el sistema filosófico de Descartes, ampliamente aclamado por los científicos de mediados del siglo XVII, el Universo físico entero semejaba un mecanismo de relojería. Una vez la máquina construida y puesta en marcha por Dios, se daba por supuesto su funcionamiento indefinido sin necesidad de reparaciones o de darle cuerda (¡pensar de otro modo implicaba que Dios no era un perfecto relojero!). A fin de asegurar que la máquina universal no podía detenerse, Descartes defendía la existencia de un principio de conservación del movimiento:

Es completamente racional suponer que Dios, ya que al crear la materia le impartió diferentes movimientos a sus partes y mantiene toda la materia en el mismo estado y condiciones en que la creó, también *conserva* en ella la *misma cantidad de movimiento*. (*Principios de Filosofía*, 1644).

Aunque se puede estar de acuerdo con esta afirmación como un principio general filosófico, no podemos juzgar su valor científico hasta que se defina, de un modo preciso, la frase «cantidad de movimiento». Descartes reconocía que esta magnitud depende de algo más que de la *celeridad* del objeto: Una bala de cañón moviéndose a 100 km/h tiene más «movimiento» que una pelota de tenis moviéndose a la misma celeridad, si comparamos el movimiento que cada móvil puede trans-

* Léase, a este respecto, H. Butterfield, *Origins of Modern Science*, cap. I.

ferir a otro objeto con el que choque. Descartes propuso definir la cantidad de movimiento por el producto: (Masa) \times (celeridad). La cantidad total de movimiento de todas las partes del mundo, o de cualquier sistema aislado, debe, pues, ser constante en todo momento, aunque el movimiento se transmita constantemente de un cuerpo a otro por colisiones dentro del sistema. En forma matemática, la suma

$$m_1v_1 + m_2v_2 + m_3v_3 + \dots = \sum_i m_iv_i$$

permanece constante, aunque v_1, v_2, \dots cambien.*

La ley de conservación del movimiento de Descartes parecía proporcionar, al principio, una descripción correcta de los choques, pero, con un examen más profundo, se revelaban dos serios defectos: En *primer lugar*, su ley propuesta, aunque fuera correcta, no basta para determinar el resultado de una colisión. Descartes, por tanto, tenía que añadir varias reglas auxiliares, algunas de las cuales eran claramente falsas. (Por ejemplo, si un objeto ligero choca contra otro pesado en reposo, el primero debe rebotar sin transferir ningún movimiento al pesado.) En *segundo lugar*, la celeridad v es una magnitud *escalar*, mientras que los experimentos indican que el resultado de un choque depende, también, de las *direcciones* del movimiento de los objetos que colisionan. (Un ejemplo extremo sería el de una colisión frontal de dos bolas de arcilla que se pegarían juntas y permanecerían en reposo después del choque; claramente, $\sum mv$ no se conserva en este caso, ya que es cero después del choque y era una cantidad positiva antes del mismo.)

Para aquellos científicos que aceptaron la postura de Descartes de que la nueva ciencia debe construirse mecanísticamente sobre la base de los movimientos y colisiones de pequeñas porciones de materia, llegó a ser imperativo encontrar una versión correcta de su ley de conservación del movimiento. Cuando la Royal Society de Londres se instituyó en 1662, varios de sus miembros (especialmente Robert Hooke y Christopher Wren), estaban ya interesados en este problema y habían realizado algunos experimentos preliminares. Christian Huygens, en Holanda, creyó haber encontrado una formulación correcta de las leyes del choque, pero no la publicó. La Royal Society comenzó a enfocar el problema en 1666 con los experimentos de choque expuestos por Hooke en las sesiones semanales; se le urgió a Wren para que preparase un informe de su primer trabajo; se pidió al matemático John Wallis que estudiara los aspectos teóricos del problema, y el secretario de la Sociedad, Henry Oldenburg, recibió instrucciones para que escribiese a Huygens solicitando un informe de su descubrimiento. A principios del año 1669, este

* El símbolo Σ (letra mayúscula griega *sigma*) se utiliza para indicar una suma de las magnitudes que le siguen, en este caso m_iv_i , en donde el índice i varía de 1 hasta N , número total de términos de la suma. Esta abreviatura es útil para escribir ecuaciones en las cuales el número de sumandos sea grande o indefinido.

esfuerzo cooperativo dio su fruto, y la Royal Society publicó en sus *Philosophical Transactions* el resultado obtenido, independientemente, por Huygens, Wallis y Wren: La *cantidad total de movimiento* de un sistema se conserva; la *cantidad de movimiento* de cualquier objeto se define por el producto *masa* \times *vector velocidad*. En la notación moderna, la definición es

$$\text{cantidad de movimiento } \mathbf{p} \equiv m\mathbf{v}. \quad (16.1)$$

Por tratarse del producto de una magnitud escalar (masa) por otra vectorial (velocidad), \mathbf{p} es también una magnitud vectorial, representable por una flecha que apunta en la misma dirección que el correspondiente vector velocidad.

La utilidad del concepto «cantidad de movimiento» considerado como vector en comparación con la magnitud escalar de igual nombre definida por Descartes se revela, más claramente, al tratar el choque frontal de dos bolas de arcilla que quedan pegadas y en reposo después de la colisión. Supongamos que ambas bolas tienen igual masa m y se mueven con celeridades iguales en sentidos opuestos antes del choque. Sus velocidades vectoriales serán \mathbf{v} y $-\mathbf{v}$, respectivamente, y la cantidad de movimiento total del sistema antes del choque, será

$$m\mathbf{v} - m\mathbf{v} = 0.$$

Si ambas velocidades son nulas después del choque, la cantidad de movimiento total será nula también, y la ley de conservación de la cantidad de movimiento se cumple. En cambio, la ley supuesta por Descartes no se cumpliría, ya que $\Sigma m_i v_i$ es finita (igual a $2m\mathbf{v}$) antes del choque y cero después.

Este tipo de choque se denomina *totalmente inelástico*; los objetos que chocan no rebotan. En el otro extremo está el choque *perfectamente elástico*, en el cual los dos objetos rebotan con las mismas celeridades que tenían antes del choque, pero en sentidos opuestos. Todos los casos intermedios de elasticidad parcial pueden ocurrir también en la Naturaleza; pero, en cada caso, la cantidad de movimiento total del sistema resulta conservarse.*

Desgraciadamente para el concepto de la máquina universal, la nueva ley de conservación de la cantidad de movimiento no garantiza que todas las partes del universo se mantengan en movimiento perpetuo. A menos que todos los choques de trozos de materia sean completamente elásticos, la cantidad total de movimiento (en el sentido de Descartes) disminuirá continuamente indicando la posibilidad de que la máquina llegue a detenerse dejando todas sus partes en reposo. Como veremos pronto, se encontró también otra ley de conservación completamente distinta, sugerida por vez primera por Huygens en sus reglas para el cálculo de los efectos

* El enunciado matemático de la ley es: $\Sigma \mathbf{p}_i$ permanece constante en todo momento, incluso aunque los valores individuales \mathbf{p}_i cambien como resultado de choques entre las partículas del sistema.

de las colisiones. Huygens proponía que en el caso particular de choques perfectamente elásticos, además de la cantidad de movimiento se debía conservar otra magnitud: el producto (*masa*) \times (*cuadrado de la velocidad*). En los siglos XVII y XVIII esta magnitud fue llamada *vis viva*, frase latina que significa «fuerza viva»:

$$vis\ viva \equiv mv^2. \quad (16.2)$$

La ley de conservación de la *vis viva* sirvió para remediar —al menos en el caso especial de las colisiones elásticas— el primer defecto de la teoría de Descartes mencionado anteriormente, proporcionando un medio para determinar el resultado de una colisión cuando se conocen las masas y las velocidades iniciales. Sin embargo, aplazaremos esta materia hasta el capítulo siguiente, volviendo ahora a la discusión de la ley de conservación de la cantidad de movimiento, que abreviaremos con las letras LCCM.

16.3 Cantidad de movimiento y leyes de Newton

Como vimos en la sec. 9.5, Newton enunció, originalmente, su segunda ley en la forma: La variación de cantidad de movimiento de un cuerpo es proporcional a la fuerza motriz (resultante) aplicada y tiene lugar en la dirección de la línea recta a lo largo de la cual actúa la fuerza. En símbolos,

$$F_{\text{res}} \propto \Delta p \quad (\text{donde } p = mv)$$

Aunque Newton no incluía explícitamente un intervalo de tiempo al establecer la ley —con frecuencia trataba de fuerzas impulsivas que producen un cambio casi instantáneo de movimiento—, actualmnete encontramos más apropiado escribir la ley en la forma.

$$F_{\text{res}} = \frac{\Delta p}{\Delta t}, \quad (16.3)$$

o sea: «la fuerza resultante que se ejerce sobre un cuerpo es igual a la variación de cantidad de movimiento del cuerpo dividida por el intervalo de tiempo durante el cual se aplica dicha fuerza». Si la fuerza no es constante durante Δt , la ecuación se aplica sólo a la fuerza *media* que actúa durante dicho intervalo de tiempo. Si nos referimos a la fuerza instantánea, tomaremos el valor de $\Delta p / \Delta t$ en el límite $\Delta t \rightarrow 0$; en dicho caso, el segundo miembro representa la variación de cantidad de movimiento por unidad de tiempo.

No es difícil ver que la Ec. (16.3) es equivalente precisamente a la forma más familiar de la segunda ley de Newton dada en la sec. 9.5. Reemplazando p por mv , tenemos (puesto que m se supone constante)

$$\Delta p = \Delta(mv) = mv_2 - mv_1 = m(v_2 - v_1) = m \Delta v;$$

y, por tanto,

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} = m \frac{\Delta v}{\Delta t}.$$

Recordando que la aceleración se define por

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

en las secciones 6.5 y 7.4, la Ec. (16.3) se reduce a

$$F_{\text{res}} = ma. \quad (16.4)$$

La segunda ley de Newton en la forma de la Ec. (16.3), junto con la tercera ley de Newton, pueden utilizarse ahora para *deducir* la ley de conservación de la cantidad de movimiento.

Supongamos dos cuerpos de masas m_A y m_B que se ejercen fuerzas entre sí durante una colisión o en cualquier otra circunstancia. Llamemos F_{AB} a la fuerza ejercida sobre el cuerpo A por el cuerpo B y F_{BA} a la fuerza ejercida sobre el cuerpo B por el cuerpo A . Ninguna otra fuerza no equilibrada actúa sobre uno u otro cuerpo, por lo que puede considerarse que ambos constituyen un sistema aislado.

Según la tercera ley de Newton (sec. 9.10), las fuerzas F_{AB} y F_{BA} son iguales en magnitud y dirección pero de sentidos opuestos:

$$F_{AB} = F_{BA}. \quad (16.5)$$

Para cualquier intervalo de tiempo Δt podemos escribir una ecuación equivalente a la (16.3) para cada cuerpo (multiplicando ambos miembros por Δt):

$$F_{AB} \Delta t = \Delta(m_A v_A) \quad (16.6a)$$

$$F_{BA} \Delta t = \Delta(m_B v_B) \quad (16.6b)$$

Según la Ec. (16.5), los primeros miembros de estas ecuaciones son iguales en magnitud y dirección; pero de sentidos opuestos. Por tanto, lo mismo sucederá con los segundos miembros; es decir,

$$\Delta(m_A v_A) = -\Delta(m_B v_B). \quad (16.7)$$

Sean v_A y v_B las velocidades de los cuerpos al comenzar el intervalo de tiempo, y v'_A y v'_B sus velocidades en un instante posterior. Entonces (suponiendo que las masas m_A y m_B no cambian) la Ec. 16.7 se convierte en

$$m_A v'_A - m_A v_A = -(m_B v'_B - m_B v_B). \quad (16.8)$$

Pasando los símbolos con apóstrofo al segundo miembro, resulta

$$m_A v_A + m_B v_B = m_A v'_A + m_B v'_B. \quad (16.9)$$

Esta ecuación representa justamente la ley de conservación de la cantidad de movimiento, ya que el primer miembro es la cantidad de movimiento total de *A* y *B* al comienzo del intervalo de tiempo y el segundo miembro la cantidad de movimiento total al final del intervalo.

Como esta ley puede deducirse de las leyes de Newton, puede parecer que no se trata, realmente, de una ley física independiente. Por otra parte, la LCCM no puede utilizarse por sí misma para deducir la segunda y tercera leyes de Newton, ya que por sí misma no proporciona el concepto de fuerza. ¿No sería, por tanto, preferible situar las tres leyes de Newton en un curso general introductorio como el presente y dejar el uso de la LCCM para cursos más avanzados que traten de problemas especiales de la mecánica?

¡No! No debemos dejar que la estructura solemne de la física de Newton nos engañe y nos haga pensar que todas las situaciones físicas sean, o puedan ser, analizadas en función de fuerzas y aceleraciones. Incluso en los problemas de choque más elementales, como los que trataremos en la sección siguiente, será extraordinariamente difícil medir las fuerzas instantáneas con suficiente precisión para permitir una aplicación directa de las leyes de Newton; sin embargo, la ley de conservación de la cantidad de movimiento nos dará, simplemente, la solución. Más tarde, cuando estudiemos las interacciones de las partículas subatómicas, veremos que las posiciones, velocidades y aceleraciones instantáneas carecen de significado, de modo que no resulta factible la aplicación de las leyes de Newton en cualquier momento; sin embargo, la LCCM es todavía aplicable. Más aún, el concepto de cantidad de movimiento resulta útil incluso cuando otras magnitudes, como la masa, pierden su significado ordinario, como ocurre en el caso de los rayos luminosos.

16.4 Ejemplos que incluyen colisiones

Nuestro primer ejemplo ilustra cómo se sospechaba una ley de conservación de la cantidad de movimiento ya antes de que Descartes la enunciara explícitamente en 1644.

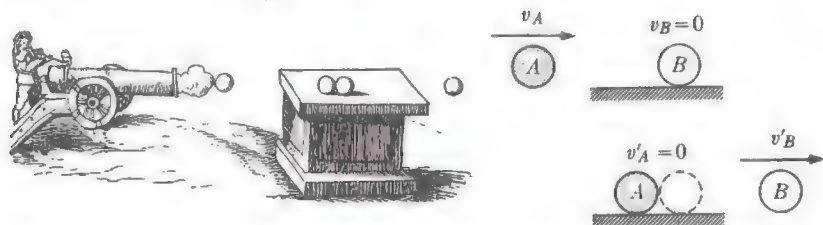


Fig. 16.1 Una bala de cañón choca contra una esfera estacionaria de igual masa. (*De Proportione Motus*, de Marcus Marci.)

Ejemplo 1. La figura 16.1, tomada del tratado *De Proportione Motus*, de Marcus Marci (1639), presenta en un diagrama la siguiente secuencia (idealizada) de sucesos observables: Una bola está quieta sobre una mesa. Una segunda bola de igual masa se dispara horizontalmente sobre la primera, choca contra ella y queda en reposo sobre la mesa mientras la otra sale con la misma velocidad que tenía la que le golpeó.

Estas observaciones, que son familiares en cualquier jugador de billar o «croquet», y que discutiremos de nuevo en el estudio de la interacción de partículas nucleares, pueden explicarse directamente con las leyes del movimiento de Newton. La tercera ley nos dice que en el corto intervalo de tiempo en que las bolas están en contacto, la fuerza deceleradora (de freno) sobre A es igual, y de sentido opuesto, que la fuerza aceleradora sobre B ; y por la segunda ley, como las masas son iguales, la aceleración de B y deceleración de A son de la misma magnitud. Así pues, debido a la colisión, la celeridad adquirida por B es igual a la perdida por A ; si A pierde toda su celeridad, B la gana toda: $v_B = v_A$.

Repitamos ahora este argumento en función de la LCCM: Dados $m_A = m_B$; v_A ; $v_B = 0$; $v'_A = 0$. Se pide v'_B .

Solución: Estas dos esferas constituyen un sistema cerrado, pues sólo las fuerzas de interacción entre ellas afectan al fenómeno.

La ley establece que $\Sigma \mathbf{p}$ antes del choque = $\Sigma \mathbf{p}$ después del choque (en donde Σ se aplica a la suma vectorial de los vectores individuales cantidad de movimiento).

$$m_A \mathbf{v}_A + m_B \mathbf{v}_B = m_A \mathbf{v}'_A + m_B \mathbf{v}'_B. \quad (16.10)$$

(Todos los vectores están dirigidos según la misma recta y en el mismo sentido. Por tanto, la adición vectorial se realiza, en este caso, como la adición algebraica.)

Sustituyendo estos datos en la ecuación anterior, resulta

$$m_A v_A + m_B \times 0 = m_A \times 0 + m_B v'_B,$$

$$v'_B = \frac{m_A}{m_B} v_A.$$

Pero como $m_A = m_B$, resulta $v'_B = v_A$

Problema 16.1 En el caso más general que las masas no sean iguales, v'_A no sería cero. Sin embargo, aplicando el mismo tipo de cálculo, demostrar que

$$v'_B = \frac{m_A}{m_B} (v_A - v'_A) + v_B.$$

Ejemplo 2. El ejemplo anterior representa una colisión perfectamente elástica (verbigracia, entre cuerpos totalmente rígidos). Consideremos ahora lo que ocurre en el caso de choque perfectamente inelástico, esto es, cuando los cuerpos que chocan no se separan después del choque, sino que quedan unidos y deformados, moviéndose como un solo cuerpo. Éste sería el caso de un coche de masa m_A y celeridad v_A que chocase contra un camión de masa m_B y celeridad v_B que iba en la misma dirección, quedando empotrado en su parte trasera. ¿Cuál sería la celeridad común de los dos cuerpos, después de la colisión?

Solución: Los datos aquí son, m_A , m_B , v_A y v_B , y las incógnitas $v'_A = v'_B = ?$ Entonces, por la ecuación (16.10) tendríamos,

$$m_A v_A + m_B v_B = (m_A + m_B) v'_B,$$

$$v'_B = \frac{m_A v_A + m_B v_B}{m_A + m_B}.$$

Ejemplo 3. Si los cuerpos que interaccionan, en lugar de moverse en el mismo sentido se aproximan uno al otro con cantidades de movimiento opuestamente dirigidas, o formando cualquier ángulo distinto de cero, la naturaleza vectorial de las cantidades de movimiento debe considerarse con más cuidado que en los casos anteriores. Sean, por ejemplo, dos esferas que moviéndose en sentidos opuestos chocan, tal como dos péndulos liberados de alturas diferentes que se encuentran en el punto más bajo de su oscilación (fig. 16.2). La colisión es perfectamente inelástica, quedan unidas; $v'_A = v'_B = ?$ Del mismo modo que acostumbramos a determinar una fuerza resultante restando tendencias opuestas, en este caso la suma de las can-

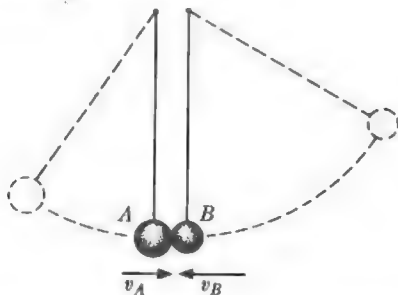


Fig. 16.2 Colisión de péndulos de igual masa.

tidades de movimiento justamente antes del choque se obtiene restando el valor numérico de $m_B v_B$ del de $m_A v_A$. Escribiremos, sin embargo, la ecuación vectorial como antes:

$$m_A v_A + m_B v_B = (m_A + m_B) v'_A,$$

$$v'_A = \frac{m_A v_A + m_B v_B}{m_A + m_B}. \quad (16.11)$$

Pero al sustituir los valores de v_A y v_B , debemos tener cuidado, como antes, de asignar valores positivos a las velocidades o cantidades de movimiento dirigidas, por ejemplo, hacia la derecha, y negativas en sentido contrario. Si $m_A = 3$ g, $m_B = 2$ g, $v_A = 8$ cm/s hacia la derecha, $v_B = 15$ cm/s hacia la izquierda, según la Ec. (16.11), Ec. (16.11),

$$v'_A = \frac{(3 \text{ g})(8 \text{ cm/s}) + (2 \text{ g})(-15 \text{ cm/s})}{(3 + 2) \text{ g}} = -1,2 \text{ cm/s}$$

y el signo negativo nos indica automáticamente que después del choque ambas esferas se mueven juntas hacia la *izquierda*. (Éste fue, incidentalmente, el tipo de experimentación según la cual los científicos de la Royal Society establecieron la validez de la LCCM en 1666-1668.)

16.5 Ejemplos que incluyen explosiones

En el capítulo 9 discutimos el experimento de los carritos de reacción, útil para la determinación de masas inertes relativas. Éste era también un ejemplo de la LCCM: Se suponía que las únicas fuerzas no equilibradas que actuaban sobre los dos cuerpos era el empuje mecánico transmitido por el muelle. Este ejemplo simboliza bien lo que ocurre en una explosión (fig. 16.3). Inicialmente, todas las partes



Fig. 16.3 Experimento de los carritos de reacción.

del sistema están en reposo, las cantidades de movimiento son nulas; entonces las fuerzas mutuamente opuestas separan los miembros del sistema. Por tanto, de

$$(p_A + p_B)_{\text{antes del suceso}} = (p_A + p_B)_{\text{después del suceso}}$$

resulta

$$0 = m_A v'_A + m_B v'_B,$$

$$m_A v'_A = -m_B v'_B.$$

Así hemos deducido la misma relación utilizada para determinar la masa m_B en función de una masa patrón m_A y las velocidades observadas v'_A y v'_B .

Problema 16.2 (a) Un viejo cañón de 500 kg montado sobre ruedas e inicialmente en reposo, dispara horizontalmente un proyectil de 5 kg con una velocidad de 1 000 m/s. Si las ruedas giran libremente, ¿cuál será la velocidad de retroceso del cañón? (b) Sin embargo, si el cañón se sujeta fuertemente al suelo, ¿cuál sería la velocidad de retroceso del cañón y de la Tierra conjuntamente ($m_{\text{Tierra}} = 6 \times 10^{27}$ g)? (c) Si el cañón tiene un ánima de 2 m de longitud y el proyectil se acelera uniformemente en su interior desde el reposo hasta la velocidad de la boca, ¿cuál será la fuerza media que experimenta el proyectil dentro del cañón? (d) ¿Cuál será la fuerza media ejercida al mismo tiempo sobre el cañón por la expansión de los gases de combustión?

16.6 Otros ejemplos

Para ilustrar la extensión y potencia de la LCCM puede aportarse una gran variedad de otros ejemplos.

Ejemplo 4. Consideremos, simplemente, un hombre que inicia un paseo. Antes de que comience, él y la Tierra están juntos en reposo (en cuanto a este problema se refiere). Tan pronto se mueve hacia delante, la Tierra debajo de él se mueve hacia atrás, ya que $p_{\text{hombre}} + p_{\text{Tierra}} = 0$ y, por tanto, $(mv)_{\text{hombre}} = -(mv)_{\text{Tierra}}$. Con toda seguridad, la variación de velocidad experimentada por la Tierra, como se puede

calcular, es extremadamente pequeña, ya que m_{Tierra} es mucho mayor que m_{hombre} . Por otra parte, si la superficie sobre la que pasea el hombre es un tablón sobre hielo, las velocidades relativas serán más igualadas. La situación, sin embargo, es la misma en ambos casos: La fuerza que «acopla» la Tierra o el tablón al sistema de cuerpos móviles en este problema es el **rozamiento**.

Como fuerza de interacción el rozamiento no se diferencia en nada de otras fuerzas. En los ejemplos anteriores en los que intervenían péndulos y carritos de reacción, las fuerzas de interacción eran elásticas; en los referentes a cañones y proyectiles, se trataba de fuerzas ejercidas por los gases a presión. La presencia del rozamiento no reduce la aplicabilidad de la LCCM; por el contrario, la extiende incluyendo a aquellos cuerpos que experimentan fuerzas mutuas de rozamiento. Si, por ejemplo, el rozamiento bajo las ruedas de los carritos de reacción no hubiera sido despreciable, habríamos escrito, en lugar de la primera ecuación de la sección 16.5,

0 al principio = $[(m_A \mathbf{v}_A + m_B \mathbf{v}_B) + m_{\text{Tierra}} \mathbf{v}_{\text{Tierra}}]$ después de la separación

Aunque esto puede complicar el cálculo, se trata de una aplicación perfectamente apropiada de la LCCM.

Problema 16.3 Imaginemos una plataforma plana de masa 1000 kg situada en el espacio interestelar y en reposo respecto a una estrella próxima. Sobre ella se encuentra un hombre de 70 kg y vemos (desde la estrella) que anda en 3 s una distancia de 5 m moviéndose uniformemente a lo largo de una recta. ¿Qué distancia creará el hombre que ha recorrido (por su medida a lo largo de la plataforma)? ¿Depende este resultado de lo deprisa que haya andado? Explicarlo. Describir el movimiento de la plataforma en el intervalo de tiempo en que el hombre empieza a andar, avanza y se detiene.

Ejemplo 5. Por último, mencionemos el papel de otra fuerza de interacción en las aplicaciones de nuestra ley: atracción mutua, bien sea gravitatoria, eléctrica o magnética.

Si aplicamos la ley de conservación a un sistema formado por una manzana y la Tierra que la atrae, la suma $\Sigma \mathbf{p}$ antes de la caída será cero. En tanto la manzana cae, atrae a la Tierra hacia arriba con la misma fuerza con que es atraída hacia abajo, y podemos decir que

$$\mathbf{p}_{\text{manzana}} + \mathbf{p}_{\text{Tierra}} = 0.$$

La manzana y la Tierra se encontrarán en un punto intermedio que divide la distancia total de separación inicial en la misma relación de las dos masas. (Demos-

trarlo como problema.) En realidad, éste es el mismo problema que encontraremos en una de las primeras apreciaciones de la LCCM. En 1609, escribía Kepler en su *Astronomia nova*:

«Si dos piedras se colocan en alguna parte del Universo, fuera del campo de fuerzas de un tercer cuerpo relacionado con ellas, entonces las dos piedras, como dos imanes, se irán aproximando y llegará un momento en que quedarán en contacto en un lugar intermedio, y las distancias recorridas por cada una serán proporcionales a la masa de la otra.»

16.7 ¿Tiene la luz cantidad de movimiento?

Otra aplicación histórica de la LCCM, aunque ya del siglo XX corresponde a la interacción entre un haz de electrones negativamente cargados y núcleos atómicos positivamente cargados. Cuando un electrón a alta velocidad pasa cerca de un núcleo, las fuerzas mutuas de atracción eléctrica desvían fuertemente al primero de su trayectoria de la misma forma que el Sol afecta a un cometa que pase próximo (fig. 16.4). Es de esperar que la variación de cantidad de movimiento del electrón Δp_{el} venga compensada, exactamente, por una cantidad correspondiente y opuesta Δp_{nucleo} . Sin embargo, al comprobar el resultado experimentalmente, encontramos que el último cambio es demasiado pequeño para explicar el Δp_{el} . ¿No es esto una evidencia de que la ley deja de cumplirse?

Estamos poco dispuestos a aceptar esta situación sin buscar una explicación en alguna parte. Recordemos que las irregularidades en el movimiento del planeta Urano también ofrecieron tal alternativa: o considerar un fallo de la antigua ley (de gravitación universal), o buscar una explicación del comportamiento enigmático mediante una hipótesis atrevida que supere los hechos inmediatamente observados; y fue este último punto el que salió triunfante y condujo al descubrimiento de Neptuno.

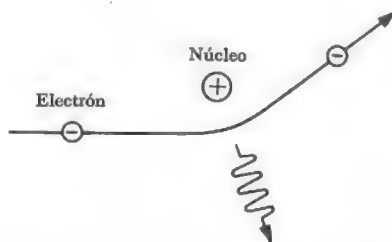


Fig. 16.4 Radiación de energía de un electrón que pasa cerca del núcleo.

Aquí también: ¿No existirá algo más que transporte cierta cantidad de movimiento? Durante la desviación del electrón se libera un pulso luminoso en la dirección general indicada, aunque de una frecuencia tan alejada del espectro visible que se necesitan instrumentos distintos del ojo para detectarlo. Si pudiéramos afirmar que la luz tiene cantidad de movimiento y asignarle la cantidad que faltaba en el balance, todo iría bien y se salvaría la ley. Sin embargo, esto no es fácil de concebir. ¿Cómo podemos hablar de cantidad de movimiento, *masa por velocidad*, donde no hay nada más que movimiento ondulatorio fuera de todo cuerpo, energía radiante?

Aunque algunos de los argumentos detallados no pueden darse aquí y otros deben ser aplazados hasta la parte H de este texto, los hechos principales son los siguientes:

I) No podemos rechazar cualquier concepto (tal como la idea de que las ondas luminosas tienen cantidad de movimiento) simplemente porque no encaja, obviamente, en nuestros pensamientos orientados hacia la mecánica. Es una limitación peligrosa insistir en las imágenes físicas. La Naturaleza, con demasiada frecuencia, nos ha forzado, en el pasado, a aceptar lo que durante un tiempo no podía, posiblemente, imaginarse. Después de todo, hubo un tiempo en que se consideraba ridículo y absurdo pensar que la Tierra se movía o que la Luna tenía montañas. Así, aunque se podía preferir en lugar de la frase «la luz tiene cantidad de movimiento» decir que «la cantidad de movimiento está *asociada* de algún modo, a las ondas luminosas», la verdad es que existe una evidencia ineludible de que así ocurre.

II) Además del experimento con electrones a alta velocidad ya descrito, existe otra evidencia de que la luz ejerce presión y puede producir variaciones de cantidad de movimiento; la más espectacular es la observación de que la materia que compone la cola de los cometas siempre se aleja del Sol en cada punto de su trayectoria. La sugerencia de que era la luz del Sol la que empujaba la cola del cometa fue hecha por vez primera nada menos que por Kepler. Medidas más modernas y rigurosas realizadas hacia 1900 demostraron, claramente, que las ondas luminosas poseían cantidad de movimiento, aunque su magnitud era ordinariamente pequeña; un buen haz no podía hacer otra cosa que mantener la rotación de una pequeña rueda de paletas montada en el vacío con el menor rozamiento posible. Además (y lo que es más importante), la cantidad de movimiento de un determinado haz luminoso puede ser prevista a partir de simples hipótesis de la teoría de la luz y, ciertamente, coincide con estos valores medidos con un error inferior al 1 %, a pesar de las serias dificultades de experimentación. (Más recientemente se llegó a la conclusión de que la mayor parte de la fuerza que actuaba empujando sobre la cola del cometa no se debe a la presión luminosa, sino al *viento solar* formado por partículas, tales como protones.)

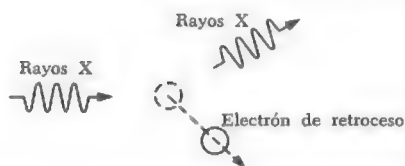


Fig. 16.5 Efecto Compton. El rayo X continúa con menor energía y mayor longitud de onda después de la difusión en un electrón de retroceso.

III) El concepto de que las ondas luminosas tienen asociada una cantidad de movimiento llegó a ser importante en otros contextos independientes; por ejemplo, en 1923 el físico americano A. H. Compton descubrió que un haz de rayos X (especie de luz de muy alta frecuencia) podía chocar con un electrón y «rebotar» con características ligeramente distintas en otra dirección, mientras el electrón «acusa» el golpe como en el caso de una bola de billar que choca contra otra (fig. 16.5). Compton determinó que la cantidad de movimiento observable del electrón de retroceso era numéricamente igual a la variación de cantidad de movimiento del rayo X, calculada a partir de la relación exigida por la ley de conservación en la fig. 16.4.* Una vez más, se salvaba la ley de conservación y, al mismo tiempo, se entendía mejor la naturaleza de la propia luz.

Textos recomendados para lecturas posteriores

R. Feynman, *The Character of Physical Law*, London: British Broadcasting Corporation, 1965; reimpreso por MIT Press; capítulo 4.

Fuentes, interpretaciones y trabajos de referencia

R. J. Blackwell, «Descartes' laws of motion», *Isis*, vol. 57, págs. 220-234 (1966).

René Descartes, extracto de la *Principia Philosophiae* (1644) sobre las leyes del movimiento, traducido en el texto de M. B. Hall, *Nature and Nature's Laws*, páginas 264-270.

R. Dugas, *Mechanics in the Seventeenth Century*, New York: Central Book Company, 1958; capítulos VII y X.

* Por este importante trabajo, que a su vez tuvo consecuencias de largo alcance en toda la física moderna, Compton fue recompensado con el Premio Nobel (1927).

A. R. Hall, «Mechanics and the Royal Society, 1668-1679», *British Journal for the History of Science*, vol. 3, págs. 24-38 (1966).

Ernst Mach, *The Science of Mechanics*, traducido del alemán por T. J. McCormack, LaSalle, Ill.: Open Court Publishing Co., 6.ª edición, 1960; págs. 376-420.



Capítulo 17

Ley de conservación de la energía

17.1 Christian Huygens y el concepto de «vis viva»

Como magnitudes fundamentales de la mecánica, en general, se toman la longitud, la masa y el tiempo. Ya hemos utilizado combinaciones de estas tres magnitudes para establecer los conceptos derivados de velocidad, aceleración, fuerza y cantidad de movimiento, cada uno de los cuales ha tenido un importante papel en alguna ley o principio físico fundamental. Vamos ahora a introducir otro de los grandes conceptos de la mecánica que necesitaremos para nuestros propósitos: el concepto de *energía*. Con ello podremos construir el poderoso principio de conservación de la energía.

La historia completa de este concepto y del principio de conservación de la energía, es lenta y sinuosa; pasaron más de ciento cincuenta años desde que fueron vislumbrados por vez primera hasta que se establecieron en su estado actual. Sus raíces se encuentran en el mismo problema que dio lugar al concepto de cantidad de movimiento y principio de la cantidad de movimiento, a saber: el problema de cómo varía el movimiento de los cuerpos cuando chocan unos con otros. Y de un modo muy significativo nos encontramos, al examinar la primera contribución importante para su formulación, al mismo hombre que había colaborado para formular el principio de conservación de la cantidad de movimiento en el choque elástico: Christian Huygens (1629-1695), el físico holandés del que se ha dicho, a menudo, que en muchos aspectos fue igual a Galileo y Newton.

Huygens no sólo era un experto matemático (Newton se refería a él como uno de los tres «mayores geómetras de su tiempo»), sino que también construyó un telescopio con el que descubrió un satélite de Saturno y, apoyado en los trabajos de Galileo, inventó el primer reloj práctico de péndulo. Entre sus grandes contribu-



Fig. 17.1. Christian Huygens (1629-1695).

ciones a la Física, se encuentran los teoremas de la fuerza centrípeta, los principios de conservación aplicados al choque elástico, la teoría de los sistemas oscilantes, y un tratado que proporcionó los fundamentos para la teoría ondulatoria de la luz.

Como indicábamos al final de la sección 16.2, Huygens propuso en 1669, como parte de su solución al problema de la colisión, la regla de que la suma extendida a todos los cuerpos del sistema del producto de la masa por el cuadrado de la velocidad permanece constante antes y después del choque en una colisión perfectamente elástica. A la cantidad mv^2 se le dio, más tarde, el nombre de *vis viva* y fue utilizada como base de las teorías mecánicas del filósofo y científico alemán Gottfried Wilhelm Leibniz y en otros trabajos de Huygens publicados alrededor de 1700 (especialmente en su tratado póstumo *De motu corporum ex percussione*, 1703).

Estudiaremos primeramente este postulado en el ejemplo concreto, pero muy general, de la figura 17.2. Dos esferas desiguales y perfectamente rígidas se aproxi-

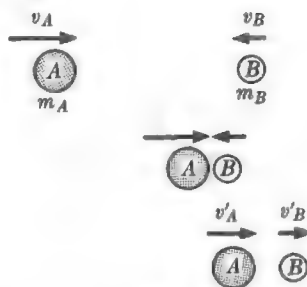


Fig. 17.2 Colisión entre dos esferas que se mueven.

man una hacia la otra con celeridades distintas, chocan y se separan. Por nuestro estudio anterior sabemos que el principio de conservación de la cantidad de movimiento exige que

$$m_A v_A + m_B v_B = m_A v'_A + m_B v'_B \quad (17.1)$$

pero no es esto todo. Lo que Huygens proponía aquí es que, a la vez, se cumple otra relación adicional, que es

$$m_A v_A^2 + m_B v_B^2 = m_A (v'_A)^2 + m_B (v'_B)^2. \quad (17.2)$$

Realmente, se trata de una proposición sorprendente. Hay que tener cuidado de no cometer aquí ningún error: la ecuación (17.2) no puede deducirse de la (17.1). En la (17.2) se incluyen los cuadrados de las velocidades y no los vectores velocidad. Es, además, una ecuación escalar, en la que no intervienen los sentidos de movimiento. En consecuencia, es válida en esta forma, tanto si *A* alcanza al cuerpo *B*, como si *B* alcanza a *A*, o si *A* y *B* se encuentran según un ángulo cualquiera. Un par de ejemplos ilustrarán la utilidad de la nueva ley.

Ejemplo 1. Recordemos el ejemplo 1 del capítulo 16. Una esfera rígida *A*, de masa m_A , se lanza con una velocidad v_A , sobre otra esfera rígida *B* de igual masa ($m_A = m_B$) que estaba inicialmente en reposo sobre la mesa ($v_B = 0$). El problema era hallar la velocidad v'_B , de la esfera *B* después del choque. Aplicando el principio de la cantidad de movimiento solamente, el problema no puede resolverse, a menos que añadamos a los cuatro datos un quinto: $v'_A = 0$; esto es debido a que la LCCM únicamente da una ecuación con seis magnitudes:

$$m_A v_A + m_B v_B = m_A v'_A + m_B v'_B \quad (16.10)$$

Sin embargo, si recordamos la Ec. (17.2),

$$m_A v_A^2 + m_B v_B^2 = m_A (v'_A)^2 + m_B (v'_B)^2. \quad (17.2)$$

tenemos dos ecuaciones con seis magnitudes; por tanto, sólo necesitamos cuatro datos para obtener las otras dos incógnitas. Por ejemplo, utilizando los anteriores respecto a las masas y las velocidades iniciales, podemos calcular directamente los valores de $(v'_A)^2$ y $(v'_B)^2$:

$$\left. \begin{array}{l} \text{De la Ec. (16.10)} \quad v_A + 0 = v'_A + v'_B \\ \text{De la Ec. (17.2):} \quad v_A^2 + 0 = (v'_A)^2 + (v'_B)^2 \end{array} \right\} \quad (17.3)$$

Elevando la primera al cuadrado y restando, resulta

$$0 = 2v'_A v'_B.$$

Por tanto, o bien v'_A o bien v'_B es cero, y la otra, que no es nula, según la Ec. (17.3) es igual a v_A . Pero si la esfera B es sólida, v'_B no puede ser cero, mientras que la bola A sigue adelante con $v'_A = v_A$. Por consiguiente, la otra alternativa es la correcta, a saber: $v'_A = 0$; $v'_B = v_A$. Esta solución es mucho más satisfactoria, ya que podemos calcular *ambas* velocidades finales exclusivamente a partir de los datos que se refieren a las condiciones iniciales antes del impacto.

Lo mismo se aplica en todos los problemas que llevan consigo colisiones directas de dos cuerpos perfectamente elásticos; con la ayuda de los principios de la cantidad de movimiento y de *vis viva*, pueden calcularse las velocidades finales de los cuerpos conociendo solamente las condiciones iniciales sin más hipótesis o datos.

Problema 17.1 En la edición póstuma del tratado de Huygens (1703), aparece este «Axioma: «Si dos cuerpos iguales (cuerpos de igual masa) se mueven en sentidos opuestos con iguales velocidades y se encuentran directamente uno con otro (en una choque perfectamente elástico) cada uno de ellos retrocede con la misma velocidad con la que llegó». Demostrar que este axioma se deduce de los principios de la cantidad de movimiento y *vis viva*.

Ejemplo 2. En un capítulo posterior necesitaremos responder a la siguiente cuestión: Un objeto muy ligero choca contra otro muy pesado inicialmente en reposo. Conocida la velocidad inicial del objeto ligero, ¿cuáles son las velocidades de ambos objetos después del choque? (El choque se supone perfectamente elástico.)

Para concretar imaginemos que el objeto ligero es una bola de goma de masa m_A y velocidad inicial v_A y el objeto pesado un gran camión de masa m_B ; la bola se lanza horizontalmente contra la puerta trasera (vertical) del camión, que está ini-

cialmente en reposo ($v_B = 0$). Despreciando la fuerza de la gravedad, no hay razón alguna para que la bola se desvíe de la línea que marca su trayectoria original; sólo puede rebotar hacia atrás con cierta velocidad v'_A que hemos de calcular. Se trata, justamente, de un problema unidimensional.

Probablemente, el lector imaginará cuál es la respuesta correcta, pero resulta instructivo ver cómo surge el resultado a partir de las dos leyes de conservación. Para empezar, hemos de definir lo que se entiende por «muy pesado» y «muy ligero». Claramente, hemos de tener en cuenta un caso límite $m_B/m_A \rightarrow \infty$, pero si hacemos esta sustitución inmediatamente, las ecuaciones contienen magnitudes indeterminadas y no pueden resolverse. Debemos, por tanto, comenzar haciendo $m_B/m_A = n$ y resolviendo el problema para un valor finito de n y tomar el límite $n \rightarrow \infty$ al final.

El mismo procedimiento usado anteriormente, sustituyendo en las Ecs. (16.10) y (17.2) y dividiendo por m_A , nos da

$$v_A + 0 = v'_A + nv'_B, \quad (17.4a)$$

$$v_A^2 + 0 = (v'_A)^2 + n(v'_B)^2 \quad (17.4b)$$

Elevando al cuadrado la primera y restando, resulta

$$0 = 2v'_A v'_B + (n-1)(v'_B)^2.$$

Como en el caso anterior, una solución de esta ecuación es $v'_B = 0$, la cual debe rechazarse por la misma razón que antes, aunque, como veremos en breve, la solución correcta converge, realmente hacia aquel valor en el límite $n \rightarrow \infty$. Sin embargo, para valores finitos de n , debemos elegir la otra solución, obtenida dividiendo por v'_B :

$$2v'_A + (n-1)v'_B = 0$$

o sea,

$$v'_A = -\frac{1}{2}(n-1)v'_B$$

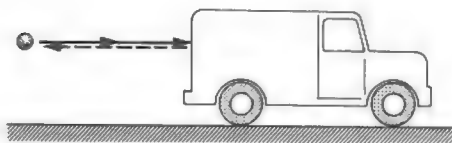


Figura 17.3

Podemos eliminar v'_B sustituyendo su valor dado en función de v_A y v'_A en la Ec. (17.4a), a saber: $v'_B = (v_A - v'_A)/n$. Despejando v'_A , resulta:

$$v'_A = - \left(\frac{n-1}{n+1} \right) v_A. \quad (17.5)$$

Por último, tomando el límite $n \rightarrow \infty$, se obtiene la respuesta deseada:

$$v'_A = -v_A.$$

¡La bola simplemente rebota con la misma celeridad en sentido opuesto! Para completar la solución, observemos que (despejando v'_B a partir de las ecuaciones anteriores) el camión está todavía en reposo después del choque.

Problema 17.2 Utilizando el resultado del ejemplo 2, demostrar que: a) Si el camión estuviera inicialmente en movimiento alejándose de la bola, ésta rebotaría con menor celeridad. b) Si el camión se moviera inicialmente hacia la bola, ésta rebotaría con mayor celeridad. (*Sugerencia:* Redefinir las velocidades tomándolas relativas a la velocidad inicial del camión v_B , por ejemplo $\tilde{v}_A = v_A - v_B$. Esto equivale a tomar un sistema de coordenadas en el cual el camión está en reposo. Después de resolver el problema en ese sistema de coordenadas, traducir los resultados al sistema original e interpretarlos.)

La utilidad del principio de conservación de la *vis viva* —como se ha demostrado— es considerable; pero, al contrario que la LCCM, *está limitado estrictamente a los impactos entre cuerpos perfectamente elásticos*. Realmente, el asunto es, incluso, más serio, pues, en general, no es posible juzgar antes del choque si éste será suficientemente elástico para admitir el uso del principio; y así, a menudo, decidimos si el principio se puede aplicar sólo después que un cálculo tentativo haya demostrado que los resultados teóricos son razonables. Este procedimiento a posteriori es algo semejante a la diagnosis de malaria en un hombre enfermo viendo si el tratamiento específico de dicha enfermedad consigue sanarle.

Evidentemente, lo que se necesita es una extensión del principio de conservación de la *vis viva*, de tal manera que se pueda aplicar a todo tipo de interacciones en un sistema cerrado. Esto se realizó, brillantemente, en el siglo XIX, y, dejando para más tarde los detalles principales del desarrollo histórico, veremos primero un resumen de los resultados.

17.2 Cuestiones preliminares: el martinete

Consideremos un cuerpo en movimiento, tal como un bloque que se desliza en un plano horizontal. Si intentamos detenerlo rápidamente interponiendo la mano en su trayectoria, se observa que el bloque ejerce una fuerza sobre la mano que pue-

de llegar a ser respetable. ¿Es éste algún tipo de fuerza nueva que no hemos todavía considerado? ¿Debe un cuerpo ejercer una fuerza sobre un obstáculo *por el hecho de estar en movimiento*, como puede decirse que un resorte ejerce una fuerza por estar comprimido, o un imán por tener un magnetismo inherente?

Ante todo, notemos que esta pintoresca manera de hablar basada en el sentido común, la cual refleja la fraseología del siglo XVII y principios del XVIII, explica poca cosa y puede conducirnos a confusiones semánticas serias. Sólo sirve para explicar el magnetismo por el magnetismo, la elasticidad por la elasticidad, etc. Por lo tanto, en lugar de hablar de una cualidad innata o fuerza inherente, tenemos que buscar hoy la relación entre la fuerza en examen y sus efectos observables. Considerando de este modo la fuerza ejercida por un cuerpo en movimiento sobre un obstáculo, como nuestra mano, en seguida vemos que aquélla no es una nueva «fuerza viva», como algunas veces se creyó. En lugar de esto, lo que nuestra mano experimenta es la fuerza de reacción correspondiente a la fuerza deceleradora o de freno que, por la segunda ley de Newton, la mano debe aplicar al objeto en movimiento para modificar su cantidad de movimiento. Esta fuerza deceleradora y su reacción son —por supuesto— numéricamente iguales al producto de la masa m del cuerpo por su deceleración a . Y esto es todo lo que hay en el problema original.

Sin embargo, es muy revelador adornar este tema. Por ejemplo, siempre ha sido de interés medir con cierta precisión la celeridad de un objeto móvil. ¿No puede hacerse esto midiendo la fuerza necesaria para detenerlo? Galileo planteó el problema de esta forma: Consideremos un cuerpo que cae; una vez ha adquirido suficiente velocidad, dejémosle caer sobre un palo vertical o estaca ligeramente hundida en un terreno arenoso (un dispositivo que corresponde al llamado martinete). Entonces:

«Está claro que si se eleva este cuerpo un codo o dos y se le deja caer sobre el mismo material, podrá, con este impulso, ejercer una nueva y mayor presión que la causada simplemente por su peso; y este efecto es debido al [peso del] cuerpo que cae junto con la velocidad adquirida durante la caída, efecto que irá creciendo con la altura de la caída, es decir, crece con la velocidad del cuerpo que cae. De la calidad e intensidad del golpe podemos estimar con bastante precisión la velocidad del cuerpo que cae. Pero decidme, caballeros: ¿no es cierto que si un bloque cae sobre una estaca desde una altura de cuatro codos y la hunde en la tierra, por ejemplo cuatro dedos, si procediera de una altura de dos codos, hundiría la estaca mucho menos, y si cayera desde un codo de altura todavía menos...?» (*Dos nuevas ciencias*, Tercer día.)

En verdad, ¿podemos estimar así, con precisión, la velocidad del cuerpo que cae? No es tan sencillo. Al detener el cuerpo, variamos su cantidad de movimiento en mv (numéricamente). Según las leyes de Newton,

$$mv = F_1 t, \quad \text{y} \quad v = \frac{F_1 t}{m}, \quad \text{en donde } F_1 \text{ es la fuerza re-}$$

sultante (media) que decelera el cuerpo (y numéricamente da también la fuerza de reacción que, a su vez, presiona sobre la estaca), t es el tiempo durante el cual la estaca está en movimiento, y m es la masa del cuerpo que cae. A menos que conozcamos el factor t (difícilmente observable con facilidad), la fuerza F_1 sobre la estaca da poca información, lo mismo que v . Si la tierra está muy compacta, t será muy pequeño, y F_1 muy grande; si el suelo es blando, t será mayor, y F_1 más pequeña para el mismo valor de v y m .

Pero ahora, ¿qué podemos decir de v en función de la distancia s que la estaca se desplaza mientras el martinete decelera desde v_1 a $v_2 = 0$ (figura 17.4)? Supongamos que la fuerza retardatriz F_1 sobre la masa que cae es constante durante el choque. Entonces, como

$$F_1 = ma,$$

$$F_1 \cdot s = mas.$$

Pero, según la Ec. (1.5),

$$as = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2}.$$

Por tanto,

$$F_1 \cdot s = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$$

Como $v_2 = 0$,

$$F_1 \cdot s = \frac{1}{2}mv_1^2 \text{ (numéricamente).}$$

Resulta ahora que para una masa determinada m y para un obstáculo que siempre ofrece la misma fuerza retardatriz (condición que se cumple bastante bien utilizando siempre la misma estaca en el mismo suelo) la distancia que recorre la estaca es proporcional a la *vis viva*, es decir, ¡al cuadrado de la velocidad del cuerpo

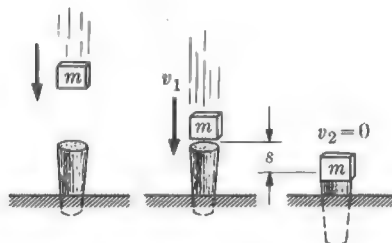


Fig. 17.4 Martinete.

móvil! Utilizando el ejemplo de Galileo, y suponiendo que 1 codo = 0,50 m y la anchura de un dedo = 0,02 m, podemos expresarnos del siguiente modo: Si un bloque cae sobre una estaca desde una altura de 2 m (con una velocidad final v de $\sqrt{2gh} \doteq 6,2$ m/s) y la hunde en la tierra una profundidad, por ejemplo de $s = 0,08$ m, la misma masa, dejada caer desde 1 m (con una velocidad final v' de 4,4 m/s), hundiría la misma estaca una distancia menor s' , a saber (en el caso ideal),

$$\frac{s'}{s} = \left(\frac{v'}{v} \right)^2, \quad \text{o bien} \quad s' = 0,08 \times \left(\frac{4,4}{6,2} \right)^2 \text{ m} = 0,04 \text{ m}.$$

Sólo con este cálculo y con estas hipótesis, el martinete de Galileo permite una comparación de las velocidades relativas.

17.3 El concepto de trabajo

El ejemplo anterior ha sido elegido por diversas razones; entre ellas porque introduce, en el contexto histórico, dos conceptos: *trabajo y energía*. La definición del primero es la siguiente:

Cuando una fuerza F_1 actúa sobre un cuerpo durante un desplazamiento s , decimos que el *producto* $F_1 \times s \times \cos \theta$ es el *trabajo realizado por F_1 sobre el cuerpo*, en donde θ es el ángulo formado por las direcciones de los dos vectores F_1 y s . Así, en el estudio anterior, el trabajo realizado por la fuerza F_1 , acción del martinete sobre la estaca era $F_1 \times s$, siendo $\cos \theta$ igual a la unidad en este caso (¿por qué?). Al mismo tiempo, el trabajo realizado por la estaca sobre la masa que cae es $F_1 \times s \times (-1) = -F_1 \times s$ (ya que el desplazamiento s y la fuerza F_1 tienen sentidos opuestos y $\cos 180^\circ = -1$). O también, si una persona arrastra un bloque en la forma indicada en la fig. 17.5 ejerciendo una tracción F_1 de 45 newton bajo un ángulo de 30° a lo largo de una distancia de 0,3 m, el trabajo realizado por esta persona es de $45 \text{ newton} \times 0,3 \text{ m} \times 0,87 = 11,7 \text{ newton-m}$. Por otra parte, si un hombre transporta una carga sobre sus hombros una distancia s sobre un plano horizontal y le suministra una fuerza de equilibrio F_1 (hacia arriba), el trabajo que realiza es cero; pues, aunque F_1 y s sean finitos, $\cos 90^\circ = 0$ (fig. 17.6). La fuerza centrípeta F_c que actúa sobre un objeto en movimiento circular no realiza ningún tra-

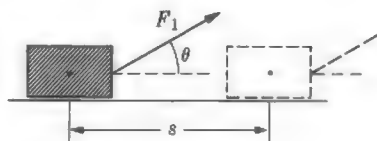


Fig. 17.5 El trabajo realizado por la fuerza F_1 sobre el bloque es $F_1 s \cos \theta$

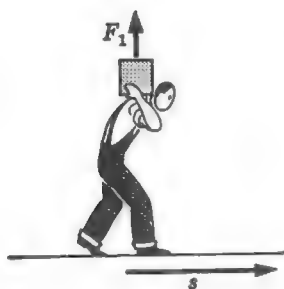


Figura 17.6

bajo, pues está dirigida formando en todo momento un ángulo de 90° con la trayectoria.

Obsérvese cuidadosamente que, como en el ejemplo ilustrado en la fig. 17.6, se puede «trabajar duro» en sentido coloquial, sin realizar ningún trabajo en sentido físico. De igual modo, si se empuja una pared rígida, F_1 será grande, $\cos \theta = 1$, pero $s = 0$ y, aunque nos fatiguemos, el trabajo realizado será nulo desde el punto de vista físico. Evidentemente, nuestras nociones subjetivas de actividad, logro o fatiga no deben confundirse con este concepto, muy distinto de la palabra «trabajo».

Antes de que continuemos en la utilidad del concepto, observemos que el trabajo es una magnitud *escalar*, aunque se trate del producto de dos magnitudes vectoriales. Las unidades de trabajo son las de una fuerza multiplicada por una distancia es decir, newton-metro, o joule, (en el sistema MKS), nombre dado en honor del científico inglés, cuya contribución se destaca en las páginas siguientes.*

Problema 17.3 Un muchacho tira de un trineo con una fuerza de 0,001 newton mediante una cuerda horizontal a través de una distancia de 1 km en un terreno horizontal. a) ¿Qué trabajo realiza el muchacho sobre el trineo en joule? ¿Y en erg? b) ¿Cuál es el trabajo realizado sobre el trineo por la fuerza gravitatoria que la Tierra ejerce sobre él?

Problema 17.4 En el ejemplo correspondiente al martinete (fig. 17.4) se supone que la distancia s es de 0,08 m, y la fuerza media necesaria para detener el cuerpo que cae es de 10 newton. a) Determinar el trabajo realizado por el martinete sobre la estaca. b) Determinar el trabajo realizado por la estaca sobre el martinete. c) Si el martinete cae de una altura de 4 m y su masa es de 20 kg, ¿qué trabajo realizará la fuerza gravitatoria sobre él durante el descenso antes de la colisión?

* Otra unidad de trabajo que se usa a veces es el *erg*, definida por 1 dina-cm (véase última nota al pie de la sec. 9.5 para la definición de la *dina*). Obsérvese que $1 \text{ joule} = 10^7 \text{ erg}$.

17.4 Diversas formas de energía

Se puede realizar trabajo sobre un cuerpo de muchas maneras y con múltiples resultados. La estaca realiza trabajo sobre el martinete descendente llevándole al reposo; al revés, el martinete realiza trabajo sobre la estaca hundiéndola en el suelo contra las fuerzas de rozamiento. La mano realiza trabajo al llevar el martinete a una posición elevada antes del descenso, estableciendo así la condición necesaria para que la gravedad realice trabajo sobre el objeto que cae y gane velocidad. Cuando un muelle se comprime o se estira con las dos manos, se realiza un trabajo sobre él. Cuando un volante empieza a girar o se frena, las fuerzas actúan sobre ciertas distancias y, de nuevo, se realiza trabajo. Evidentemente, debemos investigar lo que ocurre sistemática y cuantitativamente analizando primero los problemas mecánicos sencillos, antes de estar en condiciones de manejar a plena potencia estos conceptos.

a) *Trabajo realizado para vencer la resistencia por rozamiento.* Con mucho, el mayor consumo de trabajo realizado sobre la Tierra es el que se verifica «contra el rozamiento». Supongamos que empujamos un bloque horizontalmente con una fuerza aplicada F_{ap} a lo largo de una distancia s sobre una mesa horizontal. (Éste es, justamente, el caso de la fig. 17.5, excepto en que ahora llamamos F_{ap} a F_1 y $\theta = 0^\circ$.) El trabajo realizado por F_{ap} sobre el bloque es $F_{ap} \cdot s$. Si la fuerza F_{ap} es la justa para contrarrestar la fuerza de rozamiento f sin que quede fuerza resultante alguna para acelerar el bloque, entonces el trabajo realizado por F_{ap} , a saber: $F_{ap} \cdot s$, es numéricamente igual a $f \cdot s$. Si eliminamos F_{ap} , el bloque permanecerá en reposo en la mesa. La única recompensa por el trabajo realizado sobre el bloque es el traslado de éste de un punto a otro y un ligero calentamiento allí donde las superficies de contacto frotaban entre sí. Si llamamos a este trabajo «consumido» o «disipado», es para contrastarlo con otras situaciones en las cuales —como veremos— parte del trabajo realizado, o todo él, puede recuperarse directamente cuando cesa de actuar la fuerza F_{ap} .

b) *Trabajo realizado para vencer la inercia de los cuerpos.* Consideremos ahora el caso en que las fuerzas de rozamiento sean tan pequeñas que puedan despreciarse, p. ej., el caso de un bloque sobre un plano horizontal sin rozamiento, que esté en equilibrio a una celeridad v_1 (que podría ser nula.) Apliquemos ahora una fuerza horizontal F_{ap} mientras el bloque recorre una distancia s y se acelera hasta la celeridad v_2 . El trabajo realizado sobre el bloque viene dado por $F_{ap} \cdot s$, es decir:

$$F_{ap} \times s = mas = m \left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \right)$$

o sea,

$$F_{ap} \times s = \frac{1}{2} mv_2^2 - \frac{1}{2} mv_1^2. \quad (17.6)$$

Vemos que el trabajo realizado sobre él se invierte en variar la *vis viva* del objeto o, con mayor exactitud, una cantidad que es la mitad de la *vis viva* y a la cual hace un siglo se le dio el nombre de *energía cinética*. Representaremos la energía cinética por E_c y entonces escribiremos la ecuación (17.6) en la forma

$$F_{ap} \cdot s = \text{variación de energía cinética} \equiv \Delta E_c$$

Por ejemplo, sea un ciclotrón que acelera una partícula nuclear, verbigracia un deuterón (el núcleo de un isótopo pesado de hidrógeno, formado por un neutrón y una partícula positiva, un protón, de igual masa; la masa total del deuterón es $3,3 \times 10^{-27}$ kg). La velocidad final deseada es 1/10 de la velocidad de la luz, o sea 3×10^7 m/s. Si parte sustancialmente del reposo, ¿qué trabajo debe realizarse sobre el deuterón?

Solución: $\Delta E_c = \frac{1}{2} mv_2^2 - \frac{1}{2} mv_1^2$; aquí $v_1 = 0$; $\Delta E_c = \frac{1}{2} \times 3,3 \times 10^{-27}$ m/s) $^2 = 1,5 \times 10^{-12}$ kg m 2 /s $^2 = 1,5 \times 10^{-12}$ joule.* Según la ecuación 17.6, esto corresponde también al trabajo que se necesita (en ausencia de otros efectos como el rozamiento), y esta cantidad de trabajo viene suministrada por la acción de una fuerza eléctrica sobre la carga que se acelera. Aunque la cantidad $1,5 \times 10^{-12}$ joule pueda parecer un trabajo pequeño, las dificultades de suministrarlo son tan variadas como los efectos obtenidos con partículas tan veloces.

Así pues, el trabajo puede «convertirse» en energía y el trabajo realizado exclusivamente para incrementar la energía cinética es, en cierto sentido, directamente «recuperable», ya que cuando se deja incidir un objeto a alta velocidad sobre un blanco, puede a su vez efectuar un trabajo sobre aquél a expensas de su energía cinética. Mientras el martinete de masa m cae a lo largo de una distancia h , la fuerza constante de la gravedad, mg , efectúa sobre él un trabajo (mgh) incrementando así su energía cinética (según la ec. 17.6, $mgh = \frac{1}{2} mv_2^2$ si no hay pérdidas por rozamiento en la caída y si es nula la velocidad inicial v_1). Vulgarmente hablando, el trabajo efectuado por la gravedad se «almacena» en el objeto móvil y se dispone de él en el choque con la estaca para hincarla en el suelo.

Aunque estos ejemplos son demasiado concretos, se trata de conceptos importantes: el trabajo sobre un objeto puede convertirse en energía cinética (o, posteriormente, en otras formas de energía); al revés, la energía de un cuerpo puede utilizarse en efectuar trabajo sobre otro; e, incluso, puede realizarse trabajo contra las fuerzas de rozamiento y perderse de modo irrecuperable del sistema mecánico, apareciendo en forma de calor.

* $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2 = 1 \text{ joule}$, puesto que $1 \text{ joule} = 1 \text{ newton} \cdot \text{m} = 1 (\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2) \cdot \text{m}$.

c) *Trabajo realizado para cambiar el nivel de un objeto* Consideremos ahora el caso en que se realiza trabajo sobre un cuerpo y se le comunica energía: por ejemplo, elevamos un objeto de masa m desde el suelo hasta una altura h . La fuerza constante hacia arriba necesaria para elevarlo ha de ser numéricamente igual a mg , para contrarrestar su peso, suponiendo que despreciamos la resistencia del aire y la elevación sea tan lenta que no exista un incremento sensible de energía cinética. Pero, ¿en qué se invierte este trabajo, si no hay resistencia del aire ni incremento de la energía cinética? Evidentemente, no se ha perdido, pues si abandonamos el bloque, adquirirá un movimiento acelerado de caída debido a la gravedad recorriendo la distancia h , y en el momento de llegar al suelo habrá adquirido una energía cinética exactamente igual, en joule, al trabajo que hemos gastado para su elevación. Aquí podemos recurrir a una ficción mental y decir que el trabajo realizado al elevar el cuerpo se «almacenó» en forma de *energía potencial* en la región que rodea al cuerpo, o sea en el *campo* gravitatorio, y además que mientras caía el objeto posteriormente, de dicha región se sacaba energía potencial que se devolvía al cuerpo convirtiéndola en energía cinética. Así, al elevar una masa m una distancia h , el «trabajo efectuado por la fuerza de la gravedad» sólo representa un reintegro de una cuenta bancaria de energía que se había acumulado en la ascensión, hasta que al volver al nivel inicial inferior toda la energía se ha transformado en cinética.

Conviene no hacerse una imagen demasiado material de esta secuencia o de la sede de energía potencial y considerarlos como un dispositivo útil para la exposición en estos momentos. En el nuevo concepto sólo hay, realmente, una gran dificultad, cual es el *nivel de referencia*. Si tenemos un libro de masa m sobre una mesa en un segundo piso y nos preguntan, de sopetón, ¿cuál es su energía potencial?, de nada serviría contestar mgh , ya que no hay ninguna manera evidente de decidir cómo hay que medir h : ¿desde el suelo? o ¿desde la calle? o ¿desde el nivel del mostrador donde se encontraba cuando se compró? La verdad es que la energía potencial puede siempre referirse a un punto o nivel de referencia arbitrario que, usualmente, por conveniencia suele ser el nivel más bajo al cual desciende el cuerpo en un problema o ejemplo. Y la razón de que se pueda hacer esto es, como podrá observarse, que siempre trataremos con *diferencias* o *variaciones* de la energía potencial entre dos niveles (ΔE_p). Por tanto, no hay inconveniente en llamar simplemente $h = 0$ al nivel más bajo; por el contrario, los cálculos son mucho más simples que si tuviéramos que referir todas las energías potenciales a un cierto punto fijo, por ejemplo el centro de la Tierra, o a un punto elevado por encima de la Tierra.

Problema 17.5 Reconsideremos el caso de una pelota que rebota sobre la parte trasera del camión (ejemplo 2 y problema 17.2. en la sección 17.1) desde el punto de vista del trabajo. Demostrar que: (I) cuando el camión está parado no se realiza ningún trabajo por la pelota ni por el camión; (II) cuando el camión está, inicialmente, alejándose de la pelota, ésta trabaja sobre el camión durante el choque, y

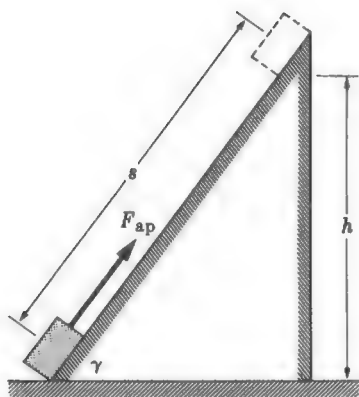


Fig. 17.7 Plano inclinado.

(III) cuando el camión está, inicialmente, moviéndose hacia la pelota, el trabajo lo realiza el camión sobre la pelota durante el choque.

17.5 Primera forma de la ley de conservación: aplicaciones

a) **El plano inclinado.** Para resumir las tres formas aquí discutidas, en las cuales un cuerpo puede disponer del trabajo que sobre él realiza una fuerza aplicada —trabajo contra el rozamiento, contra la inercia, contra las fuerzas gravitatorias—, consideremos este problema de mecánica muy típico. Un bloque de masa m se aproxima a la parte más baja de un plano inclinado con celeridad v_1 (moviéndose de izquierda a derecha) y asciende recorriendo una distancia s por la acción de una fuerza aplicada F_{ap} , como indica la fig. 17.7. También se conoce* la fuerza de rozamiento f y la cuestión es: ¿Qué parte del trabajo realizado por F_{ap} se invierte en incrementar la energía cinética del bloque? Conocido este trabajo, se puede determinar la celeridad final v_2 en la parte alta del plano.

Solución: El trabajo realizado por F_{ap} es $F_{ap} \cdot s \cdot \cos \theta$ (pero aquí θ , ángulo formado entre la dirección de s y la de F_{ap} , es cero, y $\cos \theta = 1$). Esta cantidad de trabajo se divide en tres partes, no necesariamente iguales: (I) trabajo realizado contra el rozamiento f , a saber: $f \cdot s$; (II) trabajo invertido en incrementar la energía cinética

* En un problema propuesto en clase se daría el valor del coeficiente de rozamiento μ y el ángulo γ del plano inclinado; la fuerza de rozamiento es la presión que el bloque ejerce perpendicularmente a la superficie sobre la que se apoya (en este caso es igual a la componente de su peso según una dirección perpendicular al movimiento) multiplicada por μ ; es decir, $f = \mu mg \cos \gamma$.

$(\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2)$; y (III) trabajo invertido en incrementar la energía potencial, mgh . Obsérvese que es la diferencia de nivel vertical h la que importa al calcular la energía potencial y no la longitud s de la trayectoria. En símbolos,

$$F_{ap} \cdot s \cdot (\cos \theta) = \Delta E_c + \Delta E_p + fs$$

y, en este caso,

$$F_{ap} \cdot s = (\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2) + (mgh) + fs. \quad (17.7)$$

Evidentemente, si conocemos F_{ap} , s , m y f , podremos calcular la variación de energía cinética. Hay que advertir que la fuerza F_{ap} se refiere a la fuerza que *aplicamos al bloque por medio de la mano, una soga o cualquier otro medio*, pero no figura en ella la fuerza de rozamiento ni la gravedad, pues los efectos de estas fuerzas están incluidos en el segundo miembro de la ecuación.

El argumento que hemos seguido en el ejemplo anterior evidentemente es razonable y una comprobación experimental demostraría que la ec. (17.7) es verdaderamente correcta. Pero, ¿es autoevidente o está demostrada? Ni lo uno ni lo otro. El hecho de que hayan tres maneras *evidentes* por las que un cuerpo acepte y transforme el trabajo realizado sobre él no significa que la suma de los tres términos sea necesariamente la cantidad exacta de trabajo realizado. La energía disponible podría extraerse por métodos distintos de los que hemos imaginado, o quizá el cuerpo en movimiento podría recibir energía de una fuente distinta de la fuerza aplicada. Que esto no ocurra en los fenómenos mecánicos simples, que la ec. (17.7) sea correcta, debe inicialmente ser un descubrimiento experimental, un descubrimiento que equivalga a una *ley de conservación de la energía*; ya que la ec. (17.7) nos dice que todo joule de trabajo entregado a un cuerpo puede explicarse por variaciones correspondientes de las energías cinética, potencial y por trabajo transformado en calor en los rozamientos. Más generalmente, imaginemos un sistema cerrado, por ejemplo una caja en la que hayan bolas elásticas, bloques y planos inclinados. Añadamos energía al sistema, tal vez dejando caer en la caja una bola que tenga una energía cinética de x joule. Al cabo de un tiempo veríamos que, en el interior de la caja, los cuerpos habrán distribuido, por choques mutuos, sus celeridades y posiciones, pero de tal modo que la energía que hemos comunicado sería exactamente igual a la suma de las pérdidas por rozamiento más las variaciones de energía cinética y potencial de los distintos cuerpos, desde el momento en que han experimentado la interferencia.

Todo sistema en el cual parte de la energía mecánica se disipe de manera irrecuperable, como sucede en los rozamientos, se dice que es un *sistema disipativo*. Por el contrario, en los *sistemas conservativos* no se producen tales pérdidas; en ellos, la ley de conservación de la energía se aplica de manera sencilla, ya que si el sistema conservativo estuviera totalmente aislado, es decir, no pudiera recibir ener-

gía del resto del mundo ni cederla a éste, sería $\Delta E_c + \Delta E_p = 0$, caso particular de la ley de conservación que fue expresado por primera vez de modo potente y elegante en la *Mecánica analítica* de Lagrange en 1788 pero que, de un modo u otro, se había utilizado ya mucho antes.

Problema 17.6 Examinar, de nuevo, el argumento de Galileo expuesto en la sección 17.2 a la luz de la ley de conservación de la energía.

Problema 17.7 Dos proposiciones cruciales, casi axiomáticas, en las que basó Galileo muchos razonamientos, fueron las siguientes: a) «Las celeridades que adquiere un mismo cuerpo, al bajar por planos de diferentes inclinaciones, son iguales cuando las alturas de dichos planos lo sean... con tal, desde luego, que no existan resistencias fortuitas o exteriores y que los planos sean duros y lisos». b) «...Un cuerpo que desciende por un plano inclinado (sin rozamiento) y continúa su movimiento subiendo por otro plano inclinado, subirá a causa del ímpetu adquirido hasta una altura sobre la horizontal igual a la que tenía anteriormente, de modo que si desciende según AB , el cuerpo subirá por el plano BC hasta la línea horizontal ACD ; y esto es verdad cualesquiera que sean las inclinaciones de los planos, como en el caso de los planos AB y BD ».

Demostrar que cada uno de estos postulados que utilizó Galileo pueden deducirse a partir del principio de conservación de la energía (figs. 17.8 y 17.9).

b) **Péndulos.** Sin embargo, otra región de aplicación de la ley de conservación de la energía (que abreviaremos en la forma LCE) es la relacionada con los variados e ilustrativos experimentos con péndulos, ejemplos favoritos desde los primeros días de la mecánica moderna. En la figura 17.10 se abandona un péndulo simple desde su posición más elevada a , desciende a su posición más baja c , y de nuevo vuelve a elevarse al otro lado. Mientras la masa del péndulo describe el arco de a a c , sufre un desplazamiento vertical h_a y su celeridad cambia desde $v_a = 0$ hasta $v_c = \text{máxima}$. Apliquemos ahora la LCE: Existe una fuerza F_{ap} , aplicada a la masa

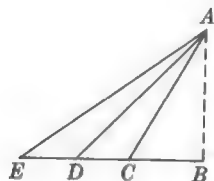


Figura 17.8

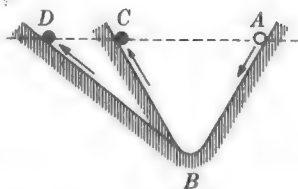


Fig. 17.9 Una bola dejada caer sobre planos exentos de rozamiento asociando a su nivel inicial.

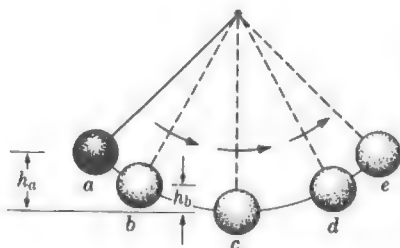


Fig. 17.10 El péndulo.

(la tensión de la cuerda), pero su dirección forma en todo instante un ángulo de 90° con su trayectoria y por tanto no realiza trabajo. Si también despreciamos las fuerzas de rozamiento, la ecuación (17.10) para el péndulo será

$$\Delta E_c + \Delta E_p = 0.$$

Y para dos posiciones cualesquiera 1 y 2 de la masa del péndulo en su trayectoria

$$\left(\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2\right) + (mgh_2 - mgh_1) = 0,$$

donde m es su masa. En particular, si las dos posiciones son a y c , y tenemos en cuenta que $v_a = 0$ y $h_c = 0$, tendremos

$$\left(\frac{1}{2}mv_c^2 - 0\right) + (0 - mgh_a) = 0,$$

de la cual, obtenemos

$$\frac{1}{2}mv_c^2 = mgh_a \quad \text{o sea} \quad v_c = \sqrt{2gh_a}.$$

Así vemos que la celeridad de la masa del péndulo, cuando pasa por el punto más bajo c después de abandonarlo en a , es exactamente la misma que tendría si

la dejásemos *caer* libremente a lo largo de la misma diferencia de niveles h_a . Además, vemos que el péndulo sube por sí mismo la misma altura a uno y otro lado de la oscilación para convertir toda su energía cinética en la posición c en energía potencial en b o a . Una vez iniciado el movimiento, el péndulo deberá ir incesantemente de una a otra posición extrema si no hay manera de que se escape su energía, haciendo pasar continuamente su energía de potencial a cinética y recíprocamente.

Problema 17.8 Se abandona la masa de 100 g de un péndulo simple sin rozamiento, desde una altura vertical h_a de 5 cm: a) Calcular la velocidad de la misma en su posición más baja de oscilación, c . b) ¿Cuál, es su energía cinética en c ? c) Calcular E_p y E_c en un punto a mitad de altura cuando esté subiendo por la otra mitad del arco.

Problema 17.9 Uno de los más famosos argumentos de Galileo se refiere a un dispositivo como el que se ve en la figura 17.11. Hagamos oscilar primeramente un péndulo simple entre los puntos B y C . Fijemos ahora un clavo en la posición D , con lo que el péndulo abandonado de nuevo en B no puede alcanzar el punto C ; el hilo se dobla en D y la masa del péndulo se eleva hasta E antes de volver. Lo importante aquí es que E se encuentra en la línea horizontal BC , aun cuando el péndulo, en la parte derecha de su oscilación, recorra ahora un arco más pequeño FE , en lugar de FC . Como Galileo hacía decir a Salviati en *Dos nuevas ciencias*: «Ahora, señores, observarán con placer que la bola oscila hasta el punto E , que está en la horizontal, y lo mismo sucedería si se colocase el obstáculo en algún punto más bajo, por ejemplo en G , alrededor del cual la bola describiría el arco FH ; la ascensión de la bola siempre terminará exactamente en la línea BC ». Explicar estas observaciones por medio del principio de conservación de la energía.

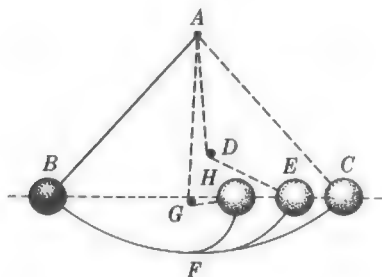


Figura 17.11

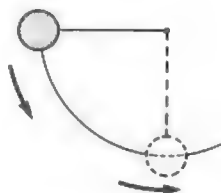


Figura 17.12

Problema 17.10 En la obra de Huygens *Horologium Oscillatorium* (1673) encontramos esta proposición : «Si un péndulo simple oscila con su máxima oscilación lateral, esto es, si recorre todo el cuadrante de un círculo (es decir, parte como indica la fig. 17.12 de una posición horizontal), cuando alcanza el punto más bajo de la circunferencia, la tensión de la cuerda es tres veces mayor que si estuviera inmóvil». Demostrar esto con ayuda de la LCE.

Problema 17.11 La medida de la velocidad de un proyectil rápido siempre ha sido difícil. Una primera solución se encontró en el denominado «péndulo balístico» de Benjamín Robins (1742). La bala de masa conocida m_b y velocidad desconocida v_b se dispara horizontalmente contra la lenteja de masa m_p de un péndulo simple que cuelga libremente y se anota la altura máxima h que alcanza la masa pendular después de la colisión inelástica con la bala. a) Con ayuda de la LCCM deducir la ecuación que da la velocidad inicial del péndulo después del impacto. b) Deducir la expresión de v_b antes del impacto en función de m_b , m_p , g y h utilizando la LCE para analizar el movimiento del péndulo.

c) *Colisiones*. Seguramente queda ahora claro que la ley de conservación de la *vis viva*, que fue el estímulo original para la más general LCE, es sólo un caso particular de ésta. Ya que si un conjunto de esferas sufren una colisión perfectamente elástica, *por la propia definición* de la expresión «perfectamente elástica» indicamos que no se pierde en procesos de rozamiento nada de la energía cinética de los cuerpos en colisión, es decir, que el sistema de cuerpos es conservativo. Para tales colisiones, bien se produzcan en un plano horizontal o, más generalmente, con tan corta duración que haga insignificante la variación de nivel durante el tiempo de choque, la LCE, que exige que

$$\Delta E_c + \Delta E_p + \text{trabajo perdido en rozamientos} = 0,$$



Figura 17.13

se reduce simplemente a

$$\Delta E_c = 0.$$

Si se trata de varios cuerpos que chocan, esto significa que

$$[\tfrac{1}{2}m_A(v'_A)^2 - \tfrac{1}{2}m_A v_A^2] + [\tfrac{1}{2}m_B(v'_B)^2 - \tfrac{1}{2}m_B v_B^2] + \dots = 0.$$

La comparación con la Ec. (17.2) nos muestra que esta ecuación es la misma que la ley de conservación de la *vis viva* (el factor $\frac{1}{2}$ puede, naturalmente, eliminarse en toda la ecuación). Además, tenemos así, en principio, un medio de calcular lo que ocurre en todas las colisiones, incluyendo aquellas que no son elásticas y en las cuales la *vis viva* (o la energía cinética) no se conserva. Aunque, en general, no es fácil juzgar cuánta energía se pierde por rozamiento, el caso no es insoluble; un tipo de solución se sugiere en seguida con el siguiente problema.

Problema 17.12 Una bola rebota sobre el suelo hasta una altura que es la tercera parte de la inicial, desde la que se dejó caer. Si tiene una masa de 5 g y se deja caer libremente desde una altura de 100 m con una velocidad inicial de 50 m/s, ¿en qué posición estará la bola después de 2,5 s? ¿Cuál será su E_c y su E_p en dicho momento?

Problema 17.13 Una experiencia muy usada es la de una serie de bolas blancas de igual masa dispuestas en línea sobre una mesa lisa (figura 17.13). Ahora lanzamos una bola negra (como las otras, perfectamente elástica) contra la serie a la velocidad v . Si su masa es igual a la de las otras, se observa que la última sale despedida con igual velocidad v . Si su masa fuera doble, no saldría despedida una bola blanca con mayor velocidad, sino que todas las bolas blancas se moverían con velocidades distintas. Demostrar que esto satisface tanto la LCCM como la LCE. Si es necesario, véase Kline, *American Journal of Physics*, vol. 28, pág. 102 (1960).

17.6 Extensiones de la ley de conservación

Por simplicidad hemos evitado, hasta ahora, una serie de importantes problemas, a los cuales no se puede aplicar la LCE tal como ha sido expuesta. ¡Esto no

significa que la LCE tenga una validez limitada! Más bien quiere decir que el significado de E_c y E_p debe extenderse un poco para cubrir otras maneras en las que puede aparecer o almacenarse energía. Dos casos que se encuentran, frecuentemente, en los problemas de mecánica elemental son la energía potencial de los cuerpos elásticos y la energía cinética de rotación. Para referencias futuras resumimos, a continuación, las fórmulas de relevancia de estos dos casos, aunque no sea necesario su estudio detallado.

a) **Energía potencial de los cuerpos elásticos.** El trabajo o la energía cinética se transforma en energía potencial cuando se utilizan para elevar un cuerpo una cierta distancia. Pero, además de la E_p gravitatoria, existen otras formas de E_p (por ejemplo, la *elástica*). Si una fuerza actúa sobre un muelle (como en la figura 17.14) comprimiéndolo una distancia x , el trabajo total realizado sobre el muelle es el producto de la fuerza media F_m durante la compresión multiplicada por el desplazamiento x . Esta magnitud $F_m \cdot x$ puede llamarse energía potencial almacenada en el muelle, pues tan pronto se elimina la fuerza externa aplicada, el muelle recupera su posición y permite utilizar (a una máquina, un reloj, etc.) toda la energía que absorbió en la compresión inicial.

La cantidad de energía almacenada en el muelle puede calcularse utilizando la *ley de Hooke* (debida al científico del siglo XVII, Robert Hooke). Dentro de límites razonables, la fuerza necesaria para comprimir un muelle es proporcional a la distancia comprimida. Como la fuerza aplicada F_c a un muelle cambia linealmente desde $F_c = 0$ al principio (cuando $x = 0$) hasta $F_c = (\text{una constante } k) \cdot x$ al final, la fuerza media es $F_m = \frac{1}{2}kx$, y el trabajo realizado $(\frac{1}{2}kx) \cdot x = \frac{1}{2}kx^2$. (El razonamiento matemático utilizado aquí es semejante al usado para demostrar el teorema de la velocidad media de Merton en la sec. 6.6.) Por tanto, la energía potencial de un muelle comprimido una distancia x es

$$E_p = \frac{1}{2}kx^2, \quad (17.8)$$

en donde k es la llamada *constante de fuerza* del muelle.

El concepto de energía potencial elástica se necesita también para entender cómo la energía puede conservarse en colisiones perfectamente elásticas. En parti-

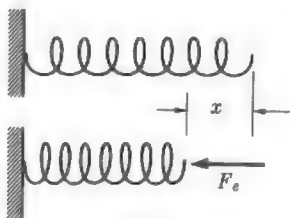


Figura 17.14

cular, en una colisión frontal de cuerpos idénticos de masa m y velocidades v_1 y $-v_1$, la energía cinética total de ambos cuerpos antes de la colisión es de $2 \cdot (\frac{1}{2}mv_1^2)$, y si la colisión es perfectamente elástica, la energía cinética total es la misma después de la colisión. Sin embargo, en el instante del choque, cuando ambos cuerpos se han detenido momentáneamente y están a punto de rebotar, la energía cinética es cero. Por tanto, para que la energía se conserve, es necesario que en ese momento se almacene temporalmente en forma de energía potencial elástica. Esto exige que los dos cuerpos se compriman en el instante de la colisión y a continuación se expandan empujando uno sobre otro en direcciones opuestas, como puede observarse tomando fotografías a alta velocidad de tales sucesos.

Problema 17.14 Si un *átomo* se define como una partícula que no puede dividirse en partes más pequeñas o cambiar sus dimensiones, ¿qué pasaría si dos átomos se aproximasen frontalmente? ¿Qué consecuencias tiene la respuesta para la cosmología de Descartes y la idea de la «máquina del mundo»?

Problema 17.15 Suponer que se puede construir un pozo cilíndrico directamente del polo Norte al polo Sur de la Tierra, admitiendo que ésta es una esfera perfectamente uniforme. Describir el movimiento de una bola que se deje caer en el agujero. (Véase problema 11.21.)

b) *Energía cinética de rotación.* Una partícula de masa m girando alrededor de un centro O con velocidad angular ω (fig. 17.15) tiene, en cada momento, la energía cinética $\frac{1}{2}mv^2$, en donde v es su celeridad lineal instantánea; de acuerdo con la Ec. (10.6), la energía cinética puede escribirse en la forma

$$E_{c_{\text{rot}}} = \frac{1}{2}mr^2\omega^2. \quad (17.9)$$

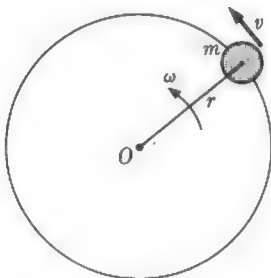


Figura 17.15

Si definimos un nuevo tipo de inercia, la *inercia rotacional* I de la partícula por la ecuación

$$I = mr^2, \quad (17.10)$$

podemos escribir de nuevo la Ec. (17.9) en forma análoga a la fórmula de la energía cinética ordinaria:

$$E_{c_{\text{rot}}} = \frac{1}{2}I\omega^2. \quad (17.11)$$

(Aquí I juega el mismo papel que la masa inerte, y ω el mismo papel que la velocidad v en la fórmula $E_c = \frac{1}{2}mv^2$.)*

La ecuación (17.11) puede aplicarse no sólo a una partícula en rotación, sino también a cualquier objeto que gira si tenemos en cuenta que la inercia rotacional I dependerá, en cada caso, de la forma y masa del objeto (por ejemplo, para un *disco sólido* de radio R y masa m puede calcularse que vale $I = \frac{1}{2}mR^2$). Así, en general, la energía cinética total de cualquier objeto puede escribirse como la suma de la energía cinética de traslación del centro de masas del objeto más la energía cinética de rotación alrededor de su centro:

$$E_{c_{\text{total}}} = E_{c_{\text{tras}}} + E_{c_{\text{rot}}}. \quad (17.12)$$

Ejemplo 1. Un disco de masa m y radio R comienza a rodar libremente desde la parte superior de un plano inclinado de altura h hasta la parte baja del mismo. ¿Cuál es la velocidad final, si se desprecia el rozamiento por rodadura?

Solución: Escribamos la LCE en forma desarrollada: $F_{ap} = 0$, v_1 y ω_1 en la parte alta = 0, $f = 0$. Por tanto,

$$\begin{aligned} \Delta E_p + \Delta E_{c_{\text{tras}}} + \Delta E_{c_{\text{rot}}} &= 0, \\ (0 - mgh) + (\tfrac{1}{2}mv^2 - 0) + (\tfrac{1}{2}I\omega^2 - 0) &= 0. \end{aligned}$$

Por otra parte, ω , velocidad angular en la parte baja, viene dada por $\omega = v/R$ e $I_{\text{disco}} = \frac{1}{2}mR^2$. Sustituyendo y operando,

$$\begin{aligned} mgh &= \tfrac{1}{2}mv^2 + \tfrac{1}{2}(\tfrac{1}{2}mR^2)\frac{v^2}{R^2}, \\ gh &= \tfrac{1}{2}v^2 + \tfrac{1}{4}v^2, \quad v = \sqrt{\tfrac{4}{3}gh}. \end{aligned}$$

* Siguiendo la analogía, se define el *momento angular o cinético* $I\omega$, y se determina una ley de conservación de esta magnitud; pero esto queda para textos más avanzados.

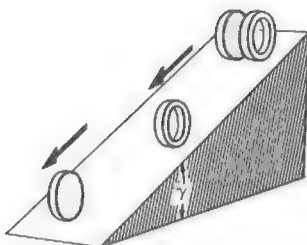


Figura 17.16

Observemos, quizás, con asombro inicial, que la celeridad final de traslación (hacia adelante) v de cualquier disco es independiente de su masa y radio. Todos los discos alcanzan la misma celeridad final para el mismo descenso y v para cualquier disco es menor (en $\sqrt{0,07 gh}$) que la de un objeto que se desliza sin rozamiento.*

Problema 17.16 Un aro y un disco de igual radio r e igual masa m se sueltan uno al lado del otro a lo largo de un plano inclinado. Pronto el disco ha dejado atrás al aro (fig. 17.16). a) Calcular y comparar las velocidades finales respectivas. b) ¿Dónde está el aro en el instante que el disco ha llegado a la parte baja?

Problema 17.17 Dar una explicación física de las razones por las cuales un cuerpo que se desliza alcanza la parte baja de un plano inclinado antes que los cuerpos que ruedan.

Problema 17.18 Discutir por qué la afirmación siguiente de Galileo es incorrecta y cómo podría corregirse: «Eliminada toda resistencia y oposición, mi razón me dice en seguida que una bola perfectamente esférica que descendiera a lo largo de las líneas CA [y] CB [una línea vertical] alcanzaría los puntos terminales A [y] B con iguales cantidades de movimiento (fig. 17.17).

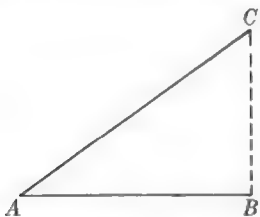


Figura 17.17

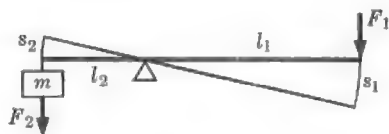


Fig. 17.18 La palanca.

* $\sqrt{2gh} - \sqrt{\frac{4}{3}gh} = \sqrt{0,07gh}$.

Problema 17.19 Experimentando con esferas que *rodaban* sobre planos lisos, Galileo confirmó la constancia de la aceleración (sec. 7.4), pero, careciendo del concepto de inercia rotacional, no pudo calcular, de tales datos, el valor de la aceleración debida a la gravedad (g) de cuerpos en caída libre. Explicar las razones.

Además de la energía potencial elástica y la energía cinética de rotación, existen otros procesos físicos que pueden añadir términos a la ecuación energética. Por ejemplo, si algunos de los cuerpos están cargados eléctricamente, habrá una variación de la energía potencial eléctrica cuando se aproximan o se alejan unos de otros, y esta variación tendrá que incluirse en la variación total de energía potencial. Si se desprende energía química en un sistema, tampoco puede ser omitida. También hemos de tener en cuenta el calor como forma de la energía, de modo que el calor comunicado a un sistema o generado dentro de él por transformación de otras formas de energía en calor, debe figurar en la expresión general de conservación de la energía. Lo mismo ocurre con el sonido, la luz y otras radiaciones que puedan transportar energía.

Si tenemos en cuenta todas las posibilidades reseñadas, obtendremos una ecuación para el principio de conservación de la energía, que podría ser como ésta:

Trabajo externo realizado sobre un sistema de cuerpos, o cualquier otra clase de energía comunicada a él, $= \Sigma[\Delta E_p$ de todos los tipos $+ \Delta E_c$ de todos los tipos $+ \text{pérdida por rozamiento} + \Delta$ (energías químicas)...].

Aunque esta expresión completa de la LCE parezca un tanto colosal, en la práctica casi siempre nos encontramos con casos como los ya vistos, es decir, casos en los que sólo tengan importancia dos o tres de los diversos tipos de cambios energéticos. Pero cada vez que la utilicemos nos sorprenderá lo general del significado de la LCE. Ante todo, la energía no puede crearse ni destruirse sin que en algún otro lugar del universo se produzca el correspondiente cambio opuesto, (p. ej., la energía cinética que comunicamos a una pelota proviene, en última instancia, de una disminución de energía química en nuestros músculos). En segundo lugar, energía de cualquier forma puede transformarse en energía de otra forma (un imán que atraiga un clavo muestra cómo la energía potencial magnética se transforma en energía cinética mecánica).

Aplicación a las máquinas. La LCE puede aplicarse en forma muy simple a las máquinas que son esencialmente dispositivos capaces de transferir (más o menos completamente) a una parte del sistema la energía representada por el trabajo realizado sobre otra parte del mismo haciéndola utilizable de algún modo conveniente. Como ejemplo, consideremos la palanca de la fig. 17.18. Aquí el sistema consiste en una barra recta apoyada sobre un pivote o *fulcro* que divide la longitud de la misma en dos partes o brazos de la palanca, l_1 y l_2 . Un peso o una resistencia $F_2 (= mg)$ en uno de los extremos de la barra se encuentra equilibrado por una fuerza F_1 aplicada en el otro extremo. Para elevar el peso deberemos aumentar F_1 in-

finitamente poco, siempre que el rozamiento en el fulcro sea despreciable. Mientras F_1 recorre el arco s_1 , F_2 recorre el arco s_2 . Si el ángulo es muy pequeño, s_1 y s_2 son prácticamente rectas perpendiculares a la horizontal con lo que el trabajo realizado por F_1 sobre el sistema será $F_1 s_1$. Este trabajo se invierte en modificar la energía cinética y potencial del peso y de la barra de la palanca. Si, además, la velocidad con que se realiza la operación es muy pequeña, $\Delta E_c = 0$ y si el peso de la palanca es despreciable frente a las fuerzas aplicadas, el trabajo $F_1 s_1$ comunicado a la palanca y al peso se invierte sólo en incrementar la E_p del peso ($\Delta E_p = F_2 \times s_2 = mgs_2$). En el caso ideal,

$$F_1 s_1 = F_2 s_2, \quad \text{o sea,} \quad F_1 = F_2 \frac{s_2}{s_1}.$$

Por triángulos semejantes (fig. 17.18), resulta $s_2 : s_1 = l_2 : l_1$. Y sustituyendo

$$F_1 = F_2 \frac{l_2}{l_1}, \quad \text{o sea,} \quad F_1 : F_2 = l_2 : l_1 \quad (17.13)$$

Es decir, *la razón del peso a la fuerza aplicada, es igual a la razón inversa de los respectivos brazos de la palanca*. Ésta es la *ley de la palanca*, conocida empíricamente desde la antigüedad clásica. Esta ley, que hemos deducido aquí a partir del principio de conservación de la energía puede también obtenerse a partir de otros postulados. El nombre más famoso, asociado a la palanca, es el de Arquímedes de Siracusa (287-212 a. de C.). El problema fue también tratado por Aristóteles, Leonardo de Vinci, Galileo y muchos otros.

Problema 17.20 Calcular primero cuánto podría pesar la Tierra y después las dimensiones y posición de la palanca que Arquímedes imaginaba para levantar la Tierra de su posición en el sistema solar, si le dieran una palanca suficientemente larga (y un fulcro).

Aquí permanece oculto un importante principio de otra rama de la mecánica. Escribiendo la Ec. 17.13 en la forma

$$F_1 l_1 = F_2 l_2,$$

el significado es el siguiente: En el equilibrio de la palanca, el par expresado por el segundo miembro (que tiende a producir un movimiento en dirección contraria a las agujas del reloj) se equilibra por el par del primer miembro (movimiento en la misma dirección que las agujas del reloj). De un modo más general, podemos decir que un cuerpo estará en equilibrio rotacional, es decir: no poseerá aceleración angular, sólo si todos los pares de sentido «horario» se equilibran con los de sentido «antihorario». Éste es el principio de equilibrio en lo que respecta al movimiento

de rotación; complementa el principio de equilibrio del movimiento de traslación, a saber: la primera ley de Newton, según la cual, para que un cuerpo carezca de aceleración lineal, deben equilibrarse las fuerzas aplicadas. La última afirmación constituye el *primer principio de la estática*; la primera es el *segundo principio de la estática*.

Problema 17.21 En la fig. 17.19, sobre una barra de peso despreciable actúan dos fuerzas iguales. Demostrar que, aunque las fuerzas se contrarrestan y, por tanto, se obedece el primer principio de la estática (principio del equilibrio de traslación), no se cumple el segundo principio de la estática; y, por consiguiente, el objeto girará con velocidad angular creciente. Sugerir dónde deben aplicarse fuerzas adicionales y de qué magnitud para cumplir *ambas* condiciones de equilibrio.

Como la palanca, la polea es una máquina simple bien conocida desde la antigüedad. Una combinación más útil y compleja formada por una polea fija y otra móvil (fig. 17.20) fue considerada por Aristóteles y analizada por Arquímedes. Cuando la mano tira del extremo libre de la cuerda, desplazándose una distancia s_1 , la polea más baja y el peso sujeto a ella se elevan una altura s_2 . Formulando las mismas hipótesis que en el caso anterior, el trabajo realizado $= \Delta E_p$ de la carga, o sea,

$$F_1 s_1 = F_2 s_2$$

y

$$F_1 = F_2 \frac{s_2}{s_1}.$$



Figura 17.19

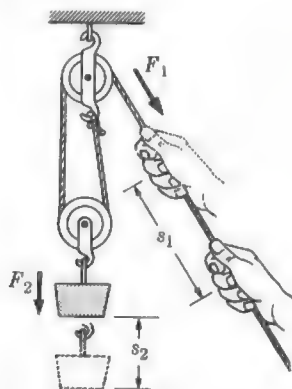


Fig. 17.20 Elevación de un peso con un polipasto.

Para este sistema particular de dos poleas, s_1 es el doble que s_2 (¿por qué?). Si el sistema constase de más de dos poleas, la razón s_1/s_2 para estos sistemas más complejos puede ser mucho mayor que 2. En todos los casos, sin embargo, si determinamos s_1/s_2 experimentalmente, la ecuación anterior permite predecir qué fuerza es necesaria, en condiciones ideales, para elevar un cierto peso sin necesidad de conocer los detalles de la construcción y funcionamiento del sistema de poleas.

Podemos dar un paso más y generalizar para el caso de cualquier dispositivo mecánico simple de la siguiente manera. Como se ve en la figura 17.21, tales máquinas pueden considerarse equivalentes a una «caja negra» que no permite ver su interior y a la cual entregamos trabajo en algún punto de entrada y obtenemos trabajo útil realizado contra un peso u otra fuerza resistente, en otro punto de salida. Podemos no saber nada acerca del mecanismo escondido en la caja, pero sí estar seguros, por el principio de conservación de la energía, que:

$$\begin{aligned} \text{Energía suministrada a la máquina (entrada o «input»)} &= \\ &= \text{energía suministrada a la carga por la máquina (salida o «output»)} + \\ &+ \text{energía retenida por la máquina (su propio } \Delta E_c + \Delta E_p + \text{pérdidas por rozamiento)}. \end{aligned}$$

Evidentemente, una buena máquina es aquella que no retrae mucha energía de la carga, en particular a causa de pérdidas en los rozamientos. Si definimos el *rendimiento* de una máquina (símbolo η , letra griega *eta*) por el cociente *salida/entrada*, la máquina ideal es aquella en que $\eta = 1,00$ (ó 100 %), aunque en la práctica pueden encontrarse valores de $\eta = 0,1$ (10%), o todavía menores.

Problema 17.22 Un polispasto *ideal*, sin peso ni rozamientos, como el representado en la figura 17.20, exigiría que F_1 valiera 10 newton si la carga fuese de 20 newton; pero en un caso real F_1 puede valer 13 newton. a) ¿Qué trabajo hay que realizar para elevar un metro la misma carga? b) ¿Cuál es el rendimiento de esta máquina, en la práctica? c) Puesto que el trabajo realizado es mayor que el que sería necesario para elevar la carga directamente sin utilizar la máquina, ¿cuál es la razón para utilizar ésta?

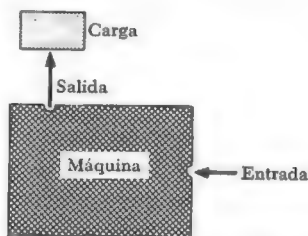


Fig. 17.21 Representación esquemática de una máquina.

17.7 Bases históricas de la ley generalizada de conservación de la energía; la naturaleza del calor

Queda todavía una última ampliación del concepto de energía: los problemas relacionados con el *calor*. Históricamente, fue justamente esta ampliación, realizada a mediados del siglo pasado, la que, en efecto, clarificó y reunió los diversos conceptos separados de la energía y así hizo posible la primera ley general de conservación de la energía. Vale, por tanto, la pena hacer una corta digresión sobre el desarrollo de las ideas referentes a la naturaleza del calor antes de estudiar los aspectos cuantitativos de las transformaciones entre el calor y otras formas de energía.

Recordemos que Aristóteles consideraba el Fuego como uno de los cuatro elementos, y que, en virtud de esta hipótesis, gran parte de la conducta observada por los cuerpos calientes podía explicarse, ciertamente, de forma cualitativa. Los antiguos atomistas griegos explicaron las diferencias de temperatura de los cuerpos —la denominada intensidad o grado de calor— por un esquema conceptual imaginando el calor como una sustancia especial, no perceptible directamente, atómica en estructura como las restantes, que se difundía a través de los cuerpos rápidamente y que, posiblemente, poseía algún peso.

Como primera etapa, esta imagen tiene sentido común, es intuitivamente clara e, incluso, bella. Aunque son discutibles algunos detalles, como el peso exacto de la hipotética sustancia calorífica, el concepto es útil en conjunto para explicar la mayor parte de las observaciones casuales, incluyendo el equilibrio de temperaturas que alcanzarán dos cuerpos cuando se mantengan en contacto entre sí. Poco a poco la imagen se hizo más precisa: se trataba de un fluido tenue, capaz de entrar y salir a través de los «poros» más pequeños, y cuya cantidad dependía de la temperatura; era imponderable y, quizás, semejante al fluido sutil y omnipresente de Descartes o a los éteres invocados por algunos para explicar la gravitación, la propagación de la luz y del calor radiante, la transmisión de las fuerzas eléctricas y magnéticas, etc. Sin embargo, los filósofos-científicos del siglo XVII, entre los que se cuentan Bacon, Galileo y Boyle, aceptaron con reparos esta teoría y se sintieron inclinados a desconfiar de la teoría del calor como fluido y, en su lugar, tendieron al punto de vista general, aunque todavía no definido, de que el calor podía explicarse directamente como una vibración o movimiento semejante a pequeña escala de las partículas atómicas de los cuerpos calientes. Los argumentos eran vagos (por ejemplo, el calor podía *engendrarse* por movimiento, como sucede en el rozamiento entre dos estacas o entre un eje y el cojinete de una rueda poco lubricada).

Durante todo el siglo XVII y buena parte del XVIII, ni la teoría del fluido, ni la del movimiento del calor, llegaron a estar firmemente establecidas, y la razón fue doble: En primer lugar, faltaban todavía ciertos conceptos claves en el estudio del calor (por ejemplo, el calor específico, el calor latente, e, incluso, la diferenciación

clara entre calor y temperatura), y en segundo lugar, no se habían desarrollado suficientemente métodos seguros de termometría y calorimetría.* En la década de 1780-1790, el gran pionero en el estudio del calor, Joseph Black, en Glasgow, y, posteriormente, en Edinburgo (1728-1799), aún se refería al calor ambiguamente diciendo «esta sustancia o modificación de la materia».

Sin embargo, una verdad significativa había comenzado a surgir en la primera mitad del siglo XVIII. En los experimentos con mezclas, al poner en presencia cuerpos de distintas temperaturas, *el calor ni se crea ni se destruye*; es decir, independientemente de la forma en que se verifica la redistribución del calor entre los distintos cuerpos que se mezclan, la cantidad total de calor permanece constante. En la terminología moderna, esta *ley de conservación del calor* se representa del siguiente modo para el caso simple y específico que incluye dos cuerpos *A* y *B*, por ejemplo, un bloque caliente de metal (*A*) que se introduce en cierta cantidad de agua fría (*B*); el calor perdido por *A* es igual al calor ganado por *B*, suponiendo que el sistema formado por ambos cuerpos está bien aislado de toda influencia exterior o pérdida. Si *A* y *B* cambian sólo sus temperaturas, pero no su composición química, ni su estado físico, la frase anterior puede simbolizarse por

$$\Delta Q_A + \Delta Q_B = 0,$$

en donde ΔQ es la variación de calor de cualquier muestra y puede calcularse a partir de la ecuación de definición.:

$$\Delta Q \text{ (cal)} = \text{masa de la muestra (g)} \times \text{calor específico [(cal/g)/}^{\circ}\text{C]} \times \\ \times [\text{temp. final} - \text{temp. inicial (en }^{\circ}\text{C)}].$$

Quizás esta regla básica de la *calorimetría* colaboró siempre en inclinar la balanza de la opinión hacia el punto de vista de que el calor era una sustancia material, ya que esa ley de conservación del calor fácilmente se armonizaba con el concepto tácitamente aceptado de *conservación de la materia*. De hecho, la teoría del fluido del calor ofrecía una imagen simple y plausible de lo que ocurre cuando se reúnen materiales diversamente calentados: El exceso de «fluido calorífico» fluye del cuerpo más caliente al más frío hasta alcanzar el equilibrio. Y, realmente, era casi inconcebible que tan simple observación pudiera explicarse por el punto de vista del calor como modo de movimiento de las partículas.

* Para la historia completa, véase D. Roller, «The early developments of the concepts of temperature and heat...» Caso 3 en las *Harvard Case Histories in Experimental Science*, por J. B. Conant (editor), (Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1950). Una historia más completa, tratando del desarrollo de estas teorías a principios del siglo XIX, puede verse en el libro de Robert Fox, *The Caloric, Theory of Gases*, New York; Oxford University Press, 1971.

A partir de 1760-70, los desarrollos siguieron un ritmo acelerado, principalmente por el trabajo de Black y sus colegas. El hipotético *fluido calórico o ígneo* (llamado calórico por Lavoisier en 1787) comenzó a tener gran aceptación al asignársele dos importantes propiedades: que las partículas del calórico, al contrario que la materia *ordinaria*, se repelen entre sí, pero son atraídas por los corpúsculos de dicha materia. Por tanto, si el calor se aplica a un objeto material, el calórico puede imaginarse que se difunde rápidamente por todo el cuerpo y se deposita en una capa o atmósfera alrededor de cada uno de los corpúsculos. Si esos corpúsculos (cuyas capas de calórico se repelen entre sí) tuvieran libertad de movimiento, como ocurre en un gas, tenderían a dispersarse tanto más intensamente cuanto mayor fuese su abundancia o el calor aplicado, de acuerdo con las leyes de los gases. Sin embargo, si el objeto que se calienta está en forma sólida o líquida, las atracciones mutuas entre los propios corpúsculos (como si fueran gravitatorias) predominan de tal modo que las atmósferas de calórico, por repulsión mutua, sólo pueden dar lugar a una ligera expansión o dilatación térmica. De todos modos, la atracción predomina hasta que se ha suministrado suficiente calórico para alcanzar la fusión o la vaporización.

El mismo modelo hacía plausible que en los cambios bruscos de estado (físico o químico) las partículas de materia presenten una capacidad muy variable de acomodación de las atmósferas de calórico, es decir: se liberaría parte de este fluido, cambiándose de un estado «latente» a otro «sensible», en el cual el calórico se comunicaría a los cuerpos próximos calentándolos. Naturalmente, esto explicaría el calor engendrado en algunas reacciones químicas o soluciones. De igual modo, es lógico que en «calor sensible» se desarrolle durante las deformaciones mecánicas: Por ejemplo, el incremento de temperatura observada en un gas cuando se le comprime rápidamente o en un trozo de metal al golpearlo fuertemente, podía considerarse como una prueba de que el calórico era exprimido de entre los espacios de las partículas ordinarias, al obligar a éstas a estar más próximas unas de otras.

Otros hechos experimentales, incluyendo los relacionados con los nuevos conceptos de calor latente y calor específico, fueron sometidos a análisis semejantes y totalmente fructíferos. Los esquemas conceptuales surgieron de todas partes, y el peso de la evidencia persuadió a casi toda Europa, a partir de 1780, de las excelencias de la teoría del calórico.

Sin embargo, esta teoría exige dos hipótesis, una de las cuales resultó ser fatal: La primera, que no podía por sí misma desacreditar toda la estructura, era el viejo problema de la posibilidad de que el material calórico tuviera peso. Naturalmente, esta cuestión fue, entonces, repetida e ingeniosamente examinada por experimentación directa. Las pruebas fueron negativas, cuando no contradictorias, debido a las dificultades inherentes de la pesada precisa a distintas temperaturas. La segunda hipótesis era que el fluido calórico se conservaba en todos los procesos térmicos.

Los primeros desafíos serios a estas hipótesis fueron proporcionados por los experimentos del conde Rumford (1753-1814). Este asombroso americano, de nom-

bre Benjamín Thompson, nació en North Woburn (Massachusetts), abandonó hacia 1798 su país natal a causa de sus simpatías reales durante la revolución y fue nombrado caballero por el rey Jorge III, y el Elector de Baviera lo nombró chambelán, ministro de la guerra y ministro de policía. Aún tuvo tiempo, a pesar de sus muchas ocupaciones políticas, para comenzar un extenso programa de experimentos encaminados a arrojar luz sobre las cuestiones relativas a la naturaleza del calor.* Rumford tuvo acceso a una de las mejores balanzas de Europa e hizo exhaustivos experimentos sobre el problema de «el peso del calor».** Comentando sus experimentos, Rumford hacía la siguiente confidencia, en 1799: «Creo que puedo sacar la conclusión, con toda seguridad, de que *todos los intentos para descubrir cualquier efecto del calor en el peso aparente de los cuerpos, serán inútiles*».

Supuesta la validez de esta conclusión, resulta que hemos vuelto al mismo terreno de hacia más de un siglo cuando luchaban los partidarios y los enemigos de la teoría del vacío, Newton contra los cartesianos, y, en cierto sentido, también Galileo contra los escolásticos, es decir, hemos vuelto a la cuestión de si la ciencia puede acomodar un fluido imponderable con propiedades materiales, asociado, quizá, a una estructura atómica, pero inaccesible a la experimentación directa e, incluso, la contemplación al faltar la característica más general de la materia, cual es el peso. Aquellos filósofos del siglo XVII, que habían rechazado los imponderables —y, como ellos Rumford— actuaron así porque no podían imaginar un fluido sin peso, una entidad mecánica, que carecía de una de las propiedades más imprescindibles de la materia ordinaria. Pero, por otra parte, los defensores de la teoría del calórico podían, igualmente, decir con Black: «Yo mismo no puedo formarme una concepción de este temblor eterno (movimiento de los corpúsculos) que tiene cierta tendencia a explicar, incluso, los efectos más simples del calor». Hasta este punto, Rumford parecía no tener muchas razones para rechazar el calórico imponderable, salvo por la falta de imaginación que ello comportaba; y esto es más sorprendente porque el mundo científico de aquel tiempo aceptaba, generalmente, toda una serie de éteres e imponderables.

Examinemos por un momento nuestra propia actitud inicial a este respecto. Hoy en día rechazaríamos, probablemente, la idea de fluidos imponderables. Si se nos pidiera una explicación, quizá confesaríamos que, para creer en una entidad física, debemos ser capaces de ponerla de manifiesto de un modo tangible. Pero esta actitud sería equivocada; hay que descartarla cuando tratemos de fotones y electrones. *Debemos estar preparados para aceptar ciertos conceptos en física, aun que no sean evidentes o no puedan imaginarse por analogías.* Debemos estar preparados para recibir cualquier concepto que sea necesario a un esquema con

* Véase la fascinante biografía de Sanborn Brown, *Count Rumford: Physicist Extraordinary*, Garden City; Doubleday, 1962.

** Los experimentos de Rumford y su discusión hacen muy agradable e instructiva la lectura del relato de Roller, *op. cit.*

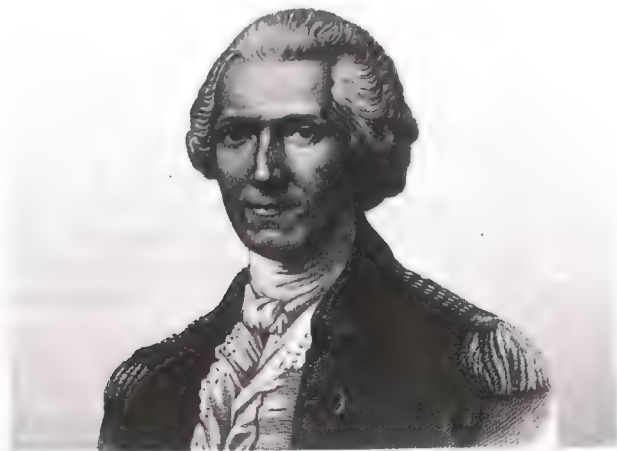


Fig. 17.22 Benjamín Thompson. Conde de Rumford (1753-1814).

ceptual si cumple estos dos requisitos: que pueda definirse sin ninguna contradicción interna ni ambigüedad, a partir de efectos mensurables y observables, sea directamente o no; y que pruebe su aptitud para la descripción y explicación de fenómenos y leyes tanto antiguos como recientes. El fluido calórico cumplía ambos requisitos en su tiempo.

Pero éstos no fueron los razonamientos que condujeron a los partidarios del calórico a aceptarlo, a pesar de su carácter imponderable; en realidad, no se sintieron grandemente contrariados por las conclusiones experimentales de Rumford y aún hallaron el modo de solventarlas. Por otra parte, Rumford no era tan ingenuo como para intentar derrocar la teoría del calórico sólo por su falta de peso mensurable. Su investigación del posible peso del calórico fue sólo una parte de los treinta años que dedicó al ataque experimental de la teoría del calórico. Rumford tuvo la fortuna de descubrir el verdadero talón de Aquiles de la teoría: un fallo de la función más valiosa y justificación principal del concepto del calórico, cual era, *su utilidad en la ley general de conservación del calor*.

Los famosos experimentos que condujeron a este descubrimiento de largo alcance fueron descritos por Rumford en 1798 del siguiente modo:*

* Reimpreso por S. C. Brown, *Benjamin Thompson-Count Rumford*, New York: Pergamon, 1967, pág. 52 y siguientes.

«[Yo] estoy persuadido de que el hábito de mantener los ojos abiertos a todo lo que ocurría en el curso ordinario de los asuntos de la vida me ha llevado —por accidente o por traviesas excursiones de la imaginación provocadas por la contemplación de las ocurrencias más comunes— a sentir dudas fructíferas y esquemas sensatos de investigación y progreso más frecuentemente que todas las meditaciones más intensas de filósofos en las horas especialmente dedicadas al estudio.

»Fue por accidente el que se me ocurriera el experimento que voy a describir... Siendo yo recientemente encargado de la dirección del horadado de cañones en la fábrica del arsenal militar de Munich, quedé sorprendido por el grado considerable de calor [temperatura] que adquiere, en un tiempo muy pequeño, una pieza de latón cuando es perforada; y por la temperatura, todavía más elevada (mucho mayor que la del agua hirviendo, como comprobé por la experiencia) de las virutas metálicas provenientes de la perforación.»

Fue, por tanto, un tipo corriente de observación, si bien realzado tanto por la alta temperatura desarrollada como por las dotes excepcionales de observación de Rumford, lo que le dio la idea de que por rozamiento se podía generar *fluido* calorífico en cantidades enormes. Como vimos, esto no era totalmente inesperado; sobre la base de la teoría del calórico el tratamiento mecánico de los metales durante la perforación haría decrecer la capacidad de mantener el calórico en el metal y, por tanto, el calor aparecía en forma libre, «sensible» (perceptible por los sentidos). Esto condujo a Rumford a realizar experimentos con las virutas y con el metal en bruto del cañón y vio que sus calores específicos no habían cambiado. Y lo que aún era más significativo, posteriores experimentos revelaron que la fuente del calor generado «en estos experimentos parece ser inagotable. No es necesario añadir que lo que un cuerpo *aislado* o sistema de cuerpos podía seguir proporcionando *sin limitación*, no podía ser una sustancia material: y me parece extremadamente difícil, si no imposible, imaginar algo capaz de ser producido o comunicado a la manera que lo es el calor en estos experimentos, si no es *movimiento*». A lo largo de sus voluminosos escritos, Rumford continúa afirmando aquellas «viejas doctrinas que se apoyan en la hipótesis de que el calor no es otra cosa que un movimiento vibratorio de las partículas del cuerpo».

Una conclusión semejante fue deducida al año siguiente por Humphry Davy, a los 21 años de edad, que posteriormente fue un químico distinguido, mediante una serie de experimentos originales basados en el frotamiento de dos trozos de hielo entre sí hasta su fusión. La gran cantidad de calor necesaria para fundir el hielo sólo puede proceder del rozamiento en vista, particularmente, del gran incremento de calor específico que se produce al transformar el hielo en agua. La conclusión de Davy de que «se ha demostrado, experimentalmente, que el calórico o materia calorífica no existe», aunque muy influenciada por el último trabajo de Mayer y Joule, es algo sorprendente; él podía haberse sentido satisfecho indicando la crea-

ción de grandes cantidades de calórico por rozamiento, contrariamente a las ideas de los «caloristas».*

Éstos y otros muchos experimentos realizados principalmente por Rumford, fueron golpes decisivos contra la teoría del calórico en 1807. Sin embargo, no fueron suficientes para convencer a los partidarios del calórico y cambiar sus puntos de vista, pues no existía ninguna otra teoría que ofrecer en su lugar. Aun cuando Rumford llegó a demostrar que la imagen del calor como un movimiento vibratorio (o de otro tipo) de las partículas ordinarias de una sustancia, explicaría cualitativamente gran cantidad de fenómenos tales como la dilatación térmica normal, la conducción del calor, los cambios de estado y la difusión de los líquidos, su teoría no podía explicar los hechos indiscutibles resumidos por la ley de conservación del calor en *mezclas* y en otros casos simples, en los cuales, como ahora exponremos, si el aislamiento es cuidadoso, la cantidad de calor del sistema se mantiene constante y ni se engendra ni se transforma. La teoría del calórico era más práctica y plausible en estos casos y en una gran variedad de otros fenómenos físicos y químicos.

Uno de los argumentos más convincentes contra la teoría de Rumford era el fenómeno del calor *radiante*, sobre el cual el propio Rumford había realizado los primeros trabajos. El hecho de que el calor pudiera viajar a través del espacio vacío (como se suponía era la región comprendida entre el Sol y la Tierra) parecía probar que el calor no podía ser, simplemente, un modo de movimiento de la materia, sino una sustancia diferente. Durante las primeras tres décadas del siglo XIX numerosos experimentos realizados por William Herschel en Inglaterra, Macedonio Melloni en Italia, James Forbes en Escocia y otros, indicaron que el calor radiante presentaba todas las características de la luz —reflexión, refracción, interferencia, polarización, etc.— y, por tanto, se trataba cualitativamente, con toda probabilidad, del mismo fenómeno. En aquel tiempo no se había establecido la moderna distinción entre calor radiante y otras formas del calor; se creía, por consiguiente, que cualquier conclusión respecto a la naturaleza del calor radiante sería válida para la naturaleza del calor en general.

Como muchos científicos de la primera mitad del siglo XIX aceptaron el principio de la identidad cualitativa del calor y la luz, encontramos la situación algo curiosa de que las opiniones respecto a la naturaleza del calor dependían hasta cierto punto de las opiniones sobre la naturaleza de la luz. Como veremos en el cap. 23, incluso antes de 1820 la teoría corpuscular de Newton sobre la luz estaba, generalmente, aceptada (es decir, la luz se consideraba que era una *sustancia*). Era, por tanto, razonable suponer que el calor era también una sustancia, compuesta, proba-

* Hay aquí un aspecto irónico. Un examen posterior de los datos y métodos de Davy ha demostrado que el hielo se fundía más por pérdidas de calor en su aparato que por rozamiento: véase Roller, op. cit., págs. 86-87.

blemente, de partículas igual que la luz. Sin embargo, como resultado de los trabajos de Thomas Young en Inglaterra, y Agustín Fresnel en Francia, la opinión científica después de 1825, aproximadamente, se desplazó hacia el punto de vista de que la luz no es una sustancia, sino un movimiento ondulatorio a través del éter. Por tanto, resultaba ahora razonable aceptar junto a una *teoría ondulatoria de la luz*, una *teoría ondulatoria del calor* (una teoría en la cual el calor se consideraba como un movimiento vibratorio del éter). Esto no significaba una vuelta a la teoría de Rumford, pero ayudó a desfasar la teoría del calórico, ¡si bien es cierto que algunos escritos de 1830 y 1840 dan la impresión de que el calórico se ha reen-carnado con el nombre de «éter»! Pero más significativo resulta el hecho de que, gracias a la teoría ondulatoria de la luz, el calor se concibe actualmente como una forma de la energía.

Sin embargo, diversas contribuciones en aquel tiempo mostraron también una relación entre el calor y otras formas de energía. La conversión de energía cinética en calor, como ocurre al martillar un clavo sobre un yunque, era de general conocimiento; lo mismo ocurría con la liberación del calor en las relaciones químicas. Unos veinte años antes que Rumford, Lavoisier y Laplace habían probado, experimentalmente, que un conejillo de Indias desarrollaba calor animal, aproximadamente, al mismo ritmo que tiene lugar en el proceso químico de quemar su dieta alimenticia. En 1819 el químico y físico francés P. L. Dulong demostraba que, cuando un gas se comprime rápidamente, el calor desarrollado es proporcional al trabajo mecánico realizado sobre él. Se iniciaron las investigaciones sobre el calor producido por la corriente eléctrica.

Y, mientras tanto, se desarrollaron otras dos influencias. El concepto de energía se definió cada vez con mayor claridad; la propia palabra *energía* (en su moderno significado) procede de 1807. Y como se ilustra particularmente en el trabajo del físico inglés Michael Faraday sobre la interacción de la corriente eléctrica, el magnetismo y la luz, cada vez se difunde más intensamente la creencia de que diversos tipos de actividades naturales están conectados entre sí y forman parte, finalmente, de una historia unificada. Al revisar este período anterior a los años 1840, se encuentra un amplio agrupamiento hacia la ley general de conservación de la energía desde muy diferentes frentes, con frecuencia más allá del contexto, las evidencias disponibles o la claridad de los propios conceptos.

El calor no sólo cambia la temperatura y el estado físico, sino que también mueve los objetos (haciendo expansionar un gas, por ejemplo), y así puede producir trabajo físico. Esto era, naturalmente, una trivialidad frente al desarrollo espectacular de las máquinas de vapor en el siglo XVIII y su efecto notable en el desarrollo industrial. Pero la relación entre el calor y el trabajo no quedó clara hasta la década 1850-60. Hasta entonces, se creía que el propio flujo del calor determinaba el movimiento de las partes de una máquina térmica de una forma parecida a la de un flujo de agua que al incidir sobre una rueda hidráulica hace girar el molino y que el propio calor no se consume en el proceso más que el agua en el otro caso.

Todo esto exigió claramente (o al menos así nos lo parece ahora con la ventaja de la retrospectiva) ir más allá de la idea cualitativa de que el calor es una forma de energía intercambiable en otras formas y realizar determinaciones específicas de equivalentes numéricos o factores de conversión de diferentes formas de energía. Las especulaciones sobre la conversión energética y los datos experimentales a partir de los cuales se calcularon los factores de conversión estaban a disposición de los científicos en las décadas de 1830 y 1840; no es, por tanto, demasiado sorprendente que el acto de reunirlos en forma coherente (lo cual definimos como el «descubrimiento» de la ley generalizada de conservación de la energía) fue realizado, casi simultánea e independientemente, por diversas personas.* A continuación estudiaremos dos de las formas en que se realizó el descubrimiento, ilustrando así la diversidad de métodos que pueden ser útiles a la ciencia.

17.8 Descubrimiento de Mayer de la conservación de la energía

En 1842 se reunieron en un ensayo diversas ideas básicas sobre la interconversión del calor y el trabajo que por vez primera sugería lo que hemos supuesto básico en las secc. 17.5 a 17.7, es decir: una *equivalencia y conservación general de todas las formas de la energía*, de la cual, la equivalencia entre el calor y el trabajo era solamente un caso particular. Este ensayo era tan fantástico, casi metafísico, y tan lleno de generalizaciones casi insostenibles, que una de las grandes revistas científicas rehusó, al principio, su publicación. El trabajo pertenecía a Julius Robert Mayer (1814-1878), luego joven doctor en la ciudad alemana de Heilbronn, su ciudad natal. Mayer dijo más tarde que empezó a pensar en estas materias cuando, como médico de un barco, observó que en los trópicos la sangre venosa era de un color más brillante que en climas más fríos,** y como el viaje era largo y no tenía ningún quehacer importante, comenzó a especular sobre la relación entre el calor animal y las reacciones químicas, y de aquí llegó a considerar el carácter intercambiable de todas las energías de la Naturaleza.

* Para un análisis completo, véase T. S. Kuhn, «Energy conservation as an example of simultaneous discovery», *Critical Problems in the History of Science* (editado por M. Clagett), Madison: University of Wisconsin Press, 1959.

** Como ilustración de la naturaleza polémica de algunos de los detalles más simples de la historia de la ciencia, anotemos que se ha asegurado, por una parte, que esta observación era «bien conocida» antes de Mayer; y, por otra, que la observación debe haber sido errónea, porque la sangre venosa ¡no es rojo brillante en los trópicos! Véase E. Farber, *Isis*, vol. 45, págs. 3-9 (1954); W. B. Ober, *New York State Journal of Medicine*, vol. 68, págs. 2447-2454 (1968).

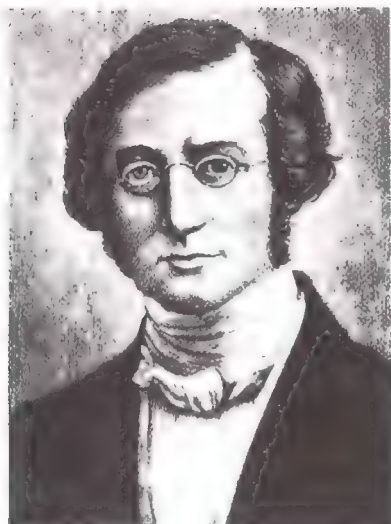


Figura 17.23 Julius Robert Mayer (1814-1878).

En 1842, en su trabajo titulado *Observaciones sobre las energías* de la naturaleza inorgánica*, establece lo siguiente:

«Las energías son causas; por tanto, podemos aplicarles el principio de que —*causa aequat effectum*. Si la causa c tiene el efecto e , entonces $e = c$;... En una cadena de causas y efectos, un término o parte de él nunca puede, como aparece claro por la naturaleza de una ecuación, hacerse igual a nada. Esta primera cualidad de todas las causas la llamaremos su indestructibilidad... Si después de producir el [efecto] e , aún permanece la [causa] c en todo o en parte, debe haber otros efectos [f , g ,...] correspondientes a la causa que aún queda. Por tanto, puesto que c se convierte en e , y e en f , etc., debemos considerar estas distintas magnitudes como diferentes formas bajo las cuales se nos aparece una misma entidad. Esta capacidad de asumir distintas formas es la segunda propiedad esencial de todas las causas. Considerando en conjunto ambas propiedades, podemos decir que las causas son entes cuantitativamente *indestructibles*, y cualitativamente *convertibles*... Las energías son, por tanto, entes indestructibles y convertibles.»

Ésta es la primera manifestación de la conservación y equivalencia de todas las formas de la energía. Pero este modo de argüir nos parece, hoy en día, falso. Las «causas» no tienen las propiedades que se deducen de esta lógica, ni puede igualarse la energía a la «causa», a no ser que con anterioridad exista una prueba *ex*

* En el original alemán, la antigua palabra *Kraft* («fuerza») se utiliza siempre en este sentido.

perimental de la indestructibilidad y convertibilidad de la energía. Pero Mayer creía que esta prueba ya la daban las experiencias previas, si se interpretaban desde su punto de vista.

Más adelante Mayer argumenta del siguiente modo, aplicando su doctrina a la química y a la mecánica:

«En innumerables casos vemos que el movimiento cesa sin haber causado otro movimiento o elevado un peso; pero la energía, una vez que existe, no puede ser aniquilada, solamente puede cambiar su forma; y entonces surge la pregunta: ¿qué otras formas es capaz de tomar la energía, aparte de las que ya conocemos, cinética y potencial (en terminología moderna)? Solamente la experiencia puede llevarnos a una conclusión.»

Aquí sigue, por el camino que ya se esperaba, el argumento de que si se engendra calor cuando dos superficies rugosas frotan una contra otra, entonces calor debe ser equivalente a movimiento. Este punto de vista había sido ya avanzado repetidas veces y empleado por Rumford y Davy y tuvo aceptación general al cabo de una década. Curiosamente, Mayer se volvió atrás de esta conclusión; su filosofía no le conducía a ninguna forma de la energía, tal como el movimiento, que fuese más importante que las restantes. Simplemente concluye:

«Si las energías potencial y cinética son equivalentes al calor, éste también debe ser, de manera natural, equivalente a la energía cinética». En consecuencia, «cerraremos nuestra disquisición (cuyas proposiciones han resultado ser consecuencias necesarias del principio *causa aequat effectum* y que están de acuerdo con todos los fenómenos de la Naturaleza) con una deducción práctica... ¿Cuánto vale la cantidad de calor que corresponde a una cantidad dada de energía cinética o potencial?»

Éste es, en verdad, el punto crucial. Los argumentos que hasta aquí hacía Mayer eran casi totalmente cualitativos, y en muchos aspectos parecen una reminiscencia de la ciencia escolástica. Es comprensible si se tiene en cuenta que el mismo Mayer no tenía facilidades para la experimentación y no encontró ninguna cooperación por parte de los físicos de su tiempo. Pero en este interrogante final de su artículo, decepcionante como una última reflexión, se promete la deducción de la equivalencia entre el calor y el trabajo, y por un método opuesto al de Rumford. He aquí la oportunidad para la comprobación empírica.

La solución de Mayer se encuentra sólo en esquema, pero podemos reconstruir los distintos pasos. En aquellas circunstancias, tuvo que amoldarse en su cálculo a los datos de experimentadores anteriores, cuya importancia había pasado inadvertida por mucho tiempo. Para explicar la naturaleza de estos datos, debemos conocer las unidades de medida del calor. Seguiremos un viejo convenio: La unidad de calor o *caloría** se define como la cantidad de calor necesaria para elevar un grado

* El nombre hace referencia a la vieja teoría del calórico, pero, naturalmente, la unidad de medida del calor no depende de la teoría acerca de la naturaleza del calor.

la temperatura en la escala *Celsius** de 1 g de agua.** Experimentalmente, puede asignarse a cada sustancia un *calor específico* (símbolo c), que numéricamente es igual a la energía calorífica para elevar en 1°C la temperatura de 1 g de aquella sustancia. Para el agua c es $1 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ por definición; para el cobre resulta experimentalmente $0,09 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$; para el plomo, $0,03 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$; y para la mayor parte de los otros sólidos y líquidos resultan valores intermedios.

En el caso de los gases —entre los que podemos incluir el aire como mezcla de gases— se presenta una dificultad interesante e importante: El calor específico depende, en alto grado, del método de medida. Si tomamos, por ejemplo, una muestra de aire en un recinto cerrado a volumen constante, debemos suministrar, por cada $^\circ\text{C}$ de aumento de temperatura, $0,17 \text{ cal}$ por gramo, e, incidentalmente, observaremos que la presión del gas se incrementa. Repetimos este experimento con la misma muestra en un cilindro que tenga uno de los lados móvil, o sea formado por un pistón (fig. 17.24). Ahora el gas, al calentarse, se expande y empuja el émbolo hacia fuera, de modo que la presión ejercida por el gas permanece constante e igual a la presión de aire exterior. El calor específico del aire a *presión constante* así calculado es de $0,24 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, es decir, alrededor de un 40 % mayor que antes. Para el caso de gases debemos, pues, especificar si se trata de calor específico a volumen constante o a presión constante. Por regla general, se representan con los símbolos c_p y c_v , respectivamente.

La diferencia entre los dos calores específicos indica que la expansión de un gas está asociada al intercambio de calor con los alrededores, y este hecho fue generalmente conocido por los científicos al principio del siglo XIX. Lo que, sin embargo, no era tan conocido es que si un gas se expande libremente en el vacío (en lugar de impulsar un pistón como en la fig. 17.24), no se produce intercambio de calor con los alrededores, es decir: no hay enfriamiento. Esto fue demostrado por el químico francés Gay-Lussac (conocido por su ley de la combinación de volúmenes, sec. 20.8) en un experimento realizado en 1807. Gay-Lussac demostró que una muestra de gas se expande libremente hacia una parte, en la que previamente se ha hecho el vacío, de una serie de recipientes conectados *sin* que se observe variación apreciable de su temperatura global, mientras que la expansión contra cual-

* Llamada así en honor de Anders Celsius (1701-1744), astrónomo sueco que propuso (en 1742) una escala de temperatura con el punto de ebullición del agua igual a 0° y el punto de congelación a 100° . Este convenio se invirtió pronto y la escala con 0° en el punto de congelación y 100° en el punto de ebullición del agua se denominó, hasta hace poco, escala *centígrada* (100 partes). Sin embargo, en la X Conferencia General de Pesos y Medidas, en 1954, se decidió redefinir la escala de temperaturas para fines científicos tomando el cero absoluto y el *punto triple* del agua como puntos fijos (véase sec. 19.3) y, por tanto, el nombre «centígrada» dejó de ser apropiado sustituyéndolo por el de *escala Celsius*.

** Esta definición es suficientemente precisa para nuestros fines pero debe advertirse que para trabajos de precisión deben especificarse las temperaturas inicial y final; por ejemplo, la caloría es la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de 1 g de agua de 15°C a 16°C (que no es lo mismo que el calor necesario para elevarla, verbigracia, de 95 a 96°C).

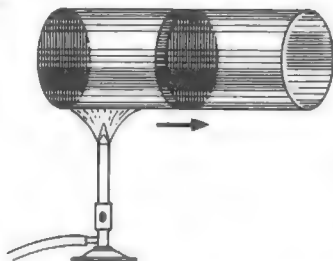


Fig. 17.24 Calentamiento de una muestra de gas en un cilindro dotado de un pistón que se desliza libremente.

quier medio o pistón sólo se producirá sin disminución de temperatura si se suministra calor. El experimento fue repetido por J. P. Joule en 1845 utilizando termómetros más precisos y, pocos años después, por J. P. Joule y William Thompson en colaboración. En algunos casos se observó un ligero efecto de enfriamiento, pero siempre mucho menor que el experimentado por un gas en expansión contra un pistón.

Mayer utilizó el experimento de expansión libre de Gay-Lussac para apoyar su argumento de que el calor desaparece, realmente, cuando efectúa trabajo mecánico. Según la teoría del calórico, cuando un gas se expansiona, su temperatura desciende porque el calórico se dispersa en un volumen mayor, pero la cantidad total de calórico se supone que permanece invariable. Sin embargo, Mayer apuntó que la temperatura desciende *sólo* cuando el gas realiza trabajo mecánico empujando un pistón a medida que se expande; si no se realiza trabajo, la temperatura permanece igual. Por tanto, el descenso de temperatura que tiene lugar cuando un gas realiza trabajo, no puede explicarse diciendo que la misma cantidad de calórico se dispersa en un volumen mayor; en su lugar, debe suponerse que el calor desaparece, realmente, cuando se realiza trabajo.

A fin de calcular la cantidad real de calor que se consume al efectuar cierta cantidad de trabajo, Mayer utilizaba el hecho, anteriormente citado, y conocido desde hacía tiempo, de que 1 g de aire requiere 0,17 cal para aumentar 1°C a volumen constante y 0,24 cal si el pistón se mueve libremente y la cámara se expansiona. Mayer suponía que también en el segundo caso se requerían 0,17 cal para incrementar la temperatura, y que las 0,07 cal restantes se necesitaban para desplazar el pistón contra el aire ambiente (normalmente a la presión constante de 1 atm o sea $1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ del área del pistón). Retrospectivamente, puede verse que esta idea es inherente a la observación de Gay-Lussac de que no existe diferencia entre los calores específicos en el caso de que el gas se expanda en el vacío, sin ninguna resistencia. En este caso, el trabajo realizado por el gas sobre el pistón (fig. 17.25) es igual a la fuerza perpendicular (F) multiplicada por la distancia desplazada (s). Pero, como la presión (P) del gas es el cociente entre la fuerza (F) y el área

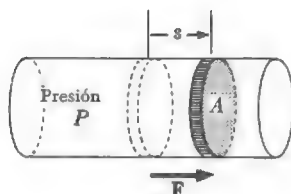


Figura 17.25

(A) sobre la que actúa F , el trabajo de expansión realizado será $(PA) \times s$. Además, $A \times s =$ variación de volumen experimentada durante la expansión del gramo de aire, y ésta es una cantidad conocida de valor $2,83 \text{ cm}^3$. Así, las $0,07 \text{ cal}$ aparecen en forma de trabajo, $1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \times 2,83 \text{ cm}^3 \approx 0,286 \text{ J}$, lo que supone que **1 cal es, aproximadamente, equivalente a 4 joule**. (Aquí se han utilizado valores aproximadamente iguales a los modernos; en las medidas atribuidas a Mayer resultaba $1 \text{ cal} \rightarrow 3,6 \text{ J}$.)

Durante una década o más se prestó poca atención al trabajo de Mayer, a pesar del hecho de que semejantes ideas y experimentos habían sido estudiados por otros científicos. El estilo de razonamiento filosófico de Mayer no convenía a aquellos que se habían acostumbrado a definir la ciencia en función de los cálculos matemáticos de Newton y la experimentación cuantitativa. Además, no era éste el caso de una crisis conceptual, generalmente reconocida, que las nuevas ideas de Mayer hubieran resuelto; en su lugar, presentaba un nuevo punto de vista que podría servir para unificar ramas previamente separadas de las ciencias físicas y cuya utilidad no se había demostrado de un modo evidente. Mayer desarrolló su principio de la indestructibilidad y estricta convertibilidad de la energía en una serie de ensayos, presentando buenos ejemplos de pruebas por cálculo y extendiendo el principio «con notable audacia, sagacidad y perfección» a los procesos químicos, astronómicos y biológicos.

Si bien el trabajo considerado retrospectivamente es el de un genio, y «en conjunto, una producción de extraordinario mérito», Mayer fue tan categóricamente rechazado que abrumado por el esfuerzo de su trabajo y de su solitaria lucha, sufrió desórdenes mentales durante algún tiempo. Posteriormente, se recuperó y fue testigo del triunfo de sus ideas y colmado de honores en los últimos años de su vida.

Este cambio de la situación personal de Mayer no significa que la ciencia fuese sentimental con él; más bien, fue una consecuencia de la aceptación general de la LCE sobre la base de una serie de sucesos completamente diferentes, entre los que destaca el notable y persistente trabajo experimental de un «amateur» de la ciencia, el inglés James Prescott Joule (1818-1889). La diferencia característica entre los dos hombres ha sido señalada muy bien por John Tyndall en su clásica obra, de agra-

dable lectura, *El calor considerado como una forma de movimiento* (1863 y ediciones posteriores):

«De acuerdo con el instinto especulativo de su país, Mayer sacó de premisas sutiles muchas e importantes conclusiones, mientras que los ingleses buscaban, por encima de todo, el firme establecimiento de los hechos. Y Mayer los estableció.»

17.9 Experimentos de Joule sobre la conservación de la energía

Joule nació cerca de Manchester. Era hijo de un acomodado cervecero en cuyo negocio le sucedió. Pero su afición de siempre fue la ciencia. A los 17 años fue alumno del físico-químico John Dalton (cap. 20), y a los 22 comenzó la serie de investigaciones que habían de ocupar la mayor parte de su vida (la prueba de que, cuando el trabajo mecánico se convierte en calor, en cualquier circunstancia, la razón del trabajo realizado al calor desarrollado, tiene un valor constante y mensurable). En parte, los motivos de Joule parecen haber sido los mismos que los de todos aquellos que habían propuesto una ley de conservación; en palabras suyas, consideraba «manifiestamente absurdo, suponer que las potencias con las cuales Dios ha dotado la materia, puedan ser destruidas».

Pero el aliciente más poderoso de Joule fue, sin duda, su puro amor a la investigación. Independientemente del trabajo de Mayer (con el cual decía, en 1850, que estaba «de acuerdo solamente en parte»), Joule anunciaba, en 1843, el primer resultado de sus trabajos, la comparación del trabajo mecánico necesario para el funcionamiento de un generador eléctrico y el calor producido por la corriente engendrada. En este tipo de experimento es extremadamente difícil obtener datos precisos y significativos a causa de la inevitable pérdida de calor, pero promediando los resultados de trece experimentos, Joule llegó a establecer la equivalencia de $1 \text{ cal} = 4,51 \text{ joule}$. Posteriormente, en el mismo año, midió el calor producido en el rozamiento del agua que fluía por un tubo delgado y el trabajo necesario para obtener este flujo, y obtuvo $J = 4,14 \text{ joule/cal}$. y concluía así:

«Me veo obligado a admitir que el conde Rumford tenía razón al atribuir el calor desarrollado en la perforación de los cañones al rozamiento...No perderé el tiempo repitiendo y ampliando estos experimentos, pues me satisface que los grandes agentes de la Naturaleza sean, por voluntad del Creador, *indestructibles*; y *que cuando la fuerza mecánica (energía) se consume, se obtiene siempre una cantidad equivalente de calor.*»

Pero, ciertamente, Joule no descansó: A pesar de la frialdad con que, generalmente, eran recibidos sus trabajos, Joule continuó en ellos casi con obstinación. En 1844 midió la razón entre el trabajo necesario para comprimir un gas y el calor de-

sarrollado, método que, en principio, era muy semejante a aquel en que Mayer había basado sus cálculos en 1842. En esta experiencia, Joule obtuvo el valor $J = 4,27$ joule/cal. Poco después, Joule inició una larga serie de experimentos, cada vez más precisos, para hallar el equivalente mecánico del calor, aprovechando el rozamiento; p. ej., agitando el agua con una rueda de paletas en un recipiente térmicamente aislado. Como la elevación de la temperatura del agua era muy pequeña, se trataba de una experiencia delicada y el resultado obtenido (4,78 joule/cal) era marcadamente diferente de los otros. En 1847 las dificultades técnicas habían disminuido, repitió las mismas experiencias de agitación de agua, y también aceite de espermá, y el resultado fue muy parecido ($\sim 4,20$ joule/cal).

Cuando quiso informar los resultados obtenidos en esta experiencia en una reunión científica, en 1847, surgió la crisis. El presidente pidió a Joule se limitase a «una breve descripción oral», porque sus comunicaciones anteriores como el mismo Joule reconoció después, «no habían despertado interés general». «Esto hice yo, y como la discusión no surgía, habría pasado sin comentarios si un joven no se hubiese levantado y creado, con sus inteligentes observaciones, un vivo interés por la nueva teoría. Este joven era William Thomson» (elevado después a la dignidad de Lord Kelvin), que tenía entonces 23 años y estaba llamado a ser uno de los más famosos científicos ingleses; había captado la importancia de la comunicación de Joule, y con su discusión hizo que se convirtiese en el punto esencial de la reunión.

En el año 1849 se obtuvieron más resultados de los experimentos de Joule, en los que intervenían rozamientos en el agua, en el mercurio (en el que la elevación de la temperatura es mayor por su menor calor específico) y entre dos discos de hierro que frotaban entre sí. Comparó estos experimentos con los de Rumford estimando un valor de unos 5,6 joule/cal a partir de los datos obtenidos en uno de los experimentos de Rumford. Considerando las incertidumbres de los datos disponibles, se debe llegar a la conclusión de que los dos valores de la equivalencia son muy próximos.

Joule, entonces, resumió todo su trabajo anterior y asignó al equivalente mecánico del calor el valor $J = 4,15$ joule/cal. Hoy día, como resultado de un siglo de perfeccionamiento en métodos de medida, el valor generalmente aceptado, es el de 4,184 joule/cal, y J , con la mayor justicia, «equivalente mecánico del calor» se conoce hoy en día también como *equivalente de Joule*.

En 1850, después de diez años de intensa actividad, Joule vio cómo sus trabajos se consideraban más seriamente como resultado de sus cuidadosas pruebas experimentales perfectamente planeadas. Durante los dieciocho años siguientes llevó a cabo otras tres determinaciones de J . Sin duda, fue la suma de su trabajo experimental sistemático la que hizo aceptable la idea de una ley general más amplia de conservación de todas las formas de energía, en lugar de la anterior aplicación concreta y limitada de dicha ley solamente a sistemas mecánicos conservativos. Pero, como suele suceder, el triunfo de Joule dependió en gran manera de desarrollos más allá de su propia participación. En los próximos capítulos veremos que, por

aquellos tiempos, la idea general acerca de la naturaleza del calor y de la propia materia evolucionaba profundamente hacia un punto de vista más favorable a la conservación del calor como forma de la energía, a saber: la energía cinética del movimiento de las moléculas. Esta concepción eliminaba la mayoría de las resistencias que, en un principio, se opusieron a Rumford, Mayer y Joule.

Además, la concepción de un principio general de conservación de la energía comenzaba a tener grandes defensores, entre ellos el joven fisiólogo y físico alemán, Hermann von Helmholtz.* Éste hizo lo que ni Mayer (entonces casi en el olvido) ni Joule habían intentado siquiera, y fue demostrar, matemáticamente, la validez del principio de conservación en los distintos campos de la ciencia (mecánica, calor, electricidad, magnetismo, química física y astronomía), y logró, de esta forma, explicar antiguos fenómenos inexplicables y establecer nuevas relaciones matemáticas susceptibles de comprobación, en términos tales, que los científicos profesionales podían reconocer en seguida. Al ir ganando la LCE más partidarios y más amplia aplicación, se descubrió que la visión de Mayer había sido profética: el principio de conservación de la energía proporciona sorprendentes relaciones generales entre las diversas ciencias. Fue, quizás, el paso mayor hacia la unidad de la ciencia desde Galileo y Newton, y una poderosa guía en la exploración de nuevos campos. Se ha dicho por un historiador científico (Dampier): «A causa de su valor práctico y de su propio interés intrínseco, el principio de conservación de la energía puede considerarse como una de las conquistas más grandes de la mente humana.»

Existe un aspecto en la historia del principio de conservación de la energía que debemos mencionar, porque representa lo que sucede, a menudo, cuando se establece un nuevo esquema conceptual de la Ciencia. Las ideas de Mayer y Joule obtuvieron, finalmente, partidarios y entonces se desarrolló una lucha casi violenta respecto a cuál de los dos era, realmente, el creador de la idea de la conservación general de la energía en sus distintas formas. Otros científicos reclamaron también su paternidad hacia esta idea, hombres que habían expresado, de algún modo, la idea general de la conversión mutua de las distintas formas de la energía o habían calculado particularmente el equivalente mecánico del calor: Ludvig Colding en Dinamarca; Karl Friedrich Mohr, Karl Holtzmann y Justus Liebig en Alemania; Sadi Carnot y Marc Séguin en Francia; Gustav Adolph Hirn en Bélgica; y W. R. Grove y Michael Faraday en Inglaterra.** Cuando un descubrimiento está obviamente «en el aire» como sugiere esta multiplicidad de descubridores, no tiene sentido reclamar

* Helmholtz tenía entonces 26 años de edad. Probablemente, no es coincidencia que la mayor parte de los protagonistas tenían menos de 30 años cuando se interesaron por la LCE.

** Los méritos de estas reclamaciones se discuten en el artículo de Kuhn citado al final de la sec. 17.7. Las actitudes de los científicos frente a la prioridad fueron discutidas ampliamente por R. K. Merton, *Proceedings of the American Philosophical Society*, vol. 105, páginas 470-486 (1961); *American Scientist*, vol. 57, págs. 1-23 (1969) y otros artículos.

prioridades; sin embargo, tales argumentos son inevitables, pues el deseo de conseguir la fama eterna por un descubrimiento es una de las motivaciones que impulsan a un científico a trabajar sin descanso en una tarea que (hasta muy recientemente) fue pobremente (o nada) remunerada. Los partidarios de Joule despreciaban la contribución de Mayer de 1842, puesto que le daba prioridad sobre Joule, cuyo primer artículo, aunque completamente independiente, databa de 1843; y el mismo Joule escribía en 1864:

«Ni en los escritos de Séguin (1839) ni en los de Mayer, de 1842, se encontraban pruebas que fuesen suficientes para su admisión, sin una investigación posterior... Parece que Mayer se precipitó en publicar sus teorías con el propósito expreso de asegurarse la prioridad. No esperó a poder apoyarlas con hechos. Mi marcha por el contrario, fue publicar solamente las teorías que había comprobado experimentalmente antes de presentarlas al público científico, bien convencido de la veracidad de la observación de Sir J. Herschel, cuando decía: *'las generalizaciones precipitadas son la ruina de la ciencia.'*»

Por otro lado, los partidarios de Mayer reclamaban la prioridad, diciendo, como Helmholtz:

«El progreso de la ciencia natural depende de que las nuevas ideas (teóricas) puedan deducirse continuamente de los hechos de que se dispone; y que las consecuencias de estas ideas, por lo que se refiere a nuevos hechos, puedan comprobarse experimentalmente. No puede haber duda acerca de la necesidad de esta segunda condición; a menudo, es esta segunda parte la más difícil y la que exige más trabajo e ingenio por parte del que la realiza, y su logro será considerado como un gran éxito. Pero la fama del descubrimiento pertenece a aquel que halló la nueva idea; la investigación experimental representa un logro mucho más mecánico. Tampoco puede pedirse que el inventor de una idea tenga la obligación de efectuar la segunda parte de la empresa. De ser esto así, habría que despedir a la mayor parte de los físicos matemáticos.»

Es éste un ejemplo de rivalidad de origen muy antiguo, mejor diríamos, de dos: una por la prioridad (toda idea grande, después que ha sido aceptada, tiende a levantar tal disputa), y otra por los méritos relativos del experimentador y del teórico. Ambas dan una idea del factor humano que se encuentra tras la estructura lógica del conocimiento científico.

17.10 Ilustraciones generales de la LCE

Como se ha demostrado, el principio de conservación de la energía puede tomar gran variedad de formas, según sea la aplicación que quiera hacerse de él, pero, en un sentido amplio, podemos agruparlas en tres:

I) *Para un sistema aislado o cerrado*, la suma de todas las formas de la energía permanece constante (la suma de las variaciones es cero), aunque la energía interna pueda tomar distintas formas. Ejemplo son las colisiones perfectamente elásticas y la desintegración radiactiva natural.

II) *Para un sistema al que se le comunica energía*, incluyendo el trabajo realizado sobre él, o el calor que se le entrega, pero que *no cede energía al exterior*, la energía comunicada al sistema es igual a la variación total de la energía interna del sistema en todas sus formas. Ejemplos son el de un gas que se comprime en un cilindro por medio de un émbolo, un bloque impulsado por un muelle, la desintegración inducida y la fisión por bombardeo de neutrones.

III) *Para un sistema al que se le comunica energía y que también realiza un trabajo o cede energía al exterior*, la energía comunicada al sistema es igual a la variación total de energía interna del sistema *más* la energía que cede al exterior. Ejemplos son las máquinas y el experimento de Joule de la rueda de paletas con desprendimiento de calor.

Pero, por supuesto, el principio de conservación de la energía es *único* y la forma particular que tome dependerá de lo grande que hayamos elegido el «sistema» en consideración. Así, cuando un hombre eleva un peso por medio de una polea, se aplicará la forma III) si se considera sólo la polea como sistema, y la forma I) si se considera el sistema formado por el peso, la polea, el hombre y la Tierra. Además, las exposiciones I) y II) son (y otra forma posible, ¿cuál?, ¿ejemplos?) casos particulares de la III), cuando se anula uno u otro factor.

En los escritos científicos, el principio de conservación de la energía suele enunciarse de diversas maneras. Una de ellas, llamada *primer principio de la Termodinámica*, es una expresión de aquél aplicable, en particular, a los casos en los que se producen intercambios entre calor y energía mecánica. El primer principio de la Termodinámica puede enunciarse de la manera siguiente:

$$\Delta E = H - W, \quad (17.14)$$

en donde E es la energía de un cuerpo, ΔE la variación de energía al pasar de un estado (es decir, una temperatura y una presión) a otro, H el calor añadido al cuerpo, y W el trabajo realizado por éste sobre sus alrededores. Además, en termodinámica se supone que la energía de un cuerpo en un estado particular no depende de cómo llegó a este estado. Así, por ejemplo, en el cálculo de Mayer del equivalente mecánico del calor (sec. 17.8), se supone que el cambio neto de energía de 1 g de aire es el mismo si se calienta 1°C a presión constante, o si se calienta primero a volumen constante (la presión crece) y luego se deja expandir levantando el pistón (haciendo trabajo y disminuyendo la presión), de tal modo que alcance el mismo estado final. En el primer caso, $\Delta E = H = 0,17$ cal; en el segundo caso,

$\Delta E = 0,24 \text{ cal} - W$. Como en el segundo caso, el cambio neto de energía debe ser $\Delta E = 0,17$, resulta que W es equivalente a $0,07 \text{ cal}$.

El hecho de que una sustancia pueda calentarse por compresión o enfriarse por expansión —es decir, su temperatura cambia sin que se produzca un intercambio real de calor con los alrededores— constituye una ilustración más del primer principio de la termodinámica. Un determinado ΔE (indicado por un cambio definido de temperatura, o, quizás, por un cambio de estado como la fusión o la evaporación) puede realizarse mediante distintas combinaciones de H y W . [Observéese que si el cuerpo pierde calor en lugar de ganarlo, H en la Ec. (17.14) es negativo. De igual modo, el trabajo W realizado sobre el cuerpo —por ejemplo comprimiéndole— también es negativo. Esto no significa que el calor o el trabajo sean, propiamente, magnitudes negativas, sino, simplemente, que contribuyen a la disminución o al aumento de la energía de un cuerpo, según el proceso que se considere.]

Otra formulación equivalente del principio de conservación de la energía, que presenta un interés particular, es la afirmación de la imposibilidad del *perpetuum mobile* (móvil perpetuo); ya que por *perpetuum mobile* se entiende, en general, una máquina de rendimiento *mayor* que 1,00 (100%) o sea que nos da una energía mayor que la que se le ha entregado. Los continuos intentos fracasados de inventar tal artificio fueron responsables, en parte, del establecimiento del principio de conservación de la energía en mecánica; en los primeros siglos, esta búsqueda atrajo aun a las mejores inteligencias, pues no era menos razonable ni exigente que la búsqueda paralela, e igualmente infructuosa, de la «piedra filosofal». Esta búsqueda del *perpetuum mobile* reflejaba también la preocupación de una civilización, cada vez más mecanicista, o aún mejor, una de las características más humanas, como es el deseo de obtener algo de la nada.

El reconocimiento de la imposibilidad de una máquina de movimiento perpetuo, que ha adquirido ahora la categoría de principio físico, es un ejemplo de los llamados *postulados de impotencia*, que tan profunda influencia han tenido en la Física. A esta clase de postulados pertenece la imposibilidad de transmutar la materia por reacciones químicas, que, en su día, ayudó a delimitar la idea de elementos químicos; la incapacidad de descubrir el movimiento relativo del éter en los experimentos ópticos, lo cual constituye un postulado fundamental de la teoría de la relatividad; la imposibilidad de obtener energía mecánica de un medio enfriándole por debajo de la temperatura ambiente* (segundo principio de la termodinámica), etc.

Los ejemplos siguientes proporcionan una mayor familiaridad con la LCE en su forma más general, y una mayor evidencia de un poderoso campo de acción.

* Una máquina que funcionara de este modo, si fuera posible, no violaría la LCE. Se denominó *perpetuum mobile de segunda especie*, y fue buscada tanto como el *perpetuum mobile de primera especie* descrito anteriormente.

El cuerpo humano como máquina. Primeramente se creyó que los animales, incluyendo el hombre, debían comer sólo para crecer y reconstruir sus tejidos. Poco a poco se fue viendo que los alimentos proporcionaban también calor y otras formas de energía, necesarias para el funcionamiento del cuerpo. Aun con peligro de simplificar demasiado un tema tan complejo, podemos comparar el cuerpo con una máquina química: el oxígeno que respiramos se combina con los azúcares, grasas y algunas de las proteínas que provienen de la digestión de los alimentos; estas moléculas complejas se transforman principalmente en dióxido de carbono, agua y otros productos de desecho. En este proceso se origina calor, y en la contracción de los músculos, trabajo mecánico.

Se han medido con precisión la energía suministrada en forma de alimento *combustible* y el correspondiente trabajo y calor que se desarrolla en el cuerpo, intentando comprobar si el proceso vital podría describirse por los mismos principios de conservación que se aplican a los fenómenos de la naturaleza inanimada. Desde 1890-1900, se sabe que esto es así. En un caso representativo, el alimento diario, si se quemase directamente fuera del organismo, proporcionaría unas 3×10^6 cal; y la cantidad de calor que se desprende más el trabajo que se realiza más la energía de los productos de deshecho da la misma cifra, dentro de un pequeño error experimental. Pero el cuerpo, considerado como máquina capaz de realizar trabajo mecánico tiene, ordinariamente, un rendimiento inferior al 20%. Por eso, al realizar mucho trabajo físico en un tiempo muy corto, el correspondiente calor desarrollado será muy grande, y como la disipación del calor no se realiza rápidamente, el cuerpo se calentará excesivamente.

Fotosíntesis. Si la energía de los animales hubiera de obtenerse de un combustible natural tal como el petróleo, la reserva alimenticia de nuestra Tierra se habría agotado hace tiempo. La forma presente de la vida animal depende del hecho de que las plantas verdes sintetizan continuamente los combustibles corporales, los cuales se disponen fácilmente en forma de vegetales. Las plantas verdes extraen dióxido de carbono y agua del medio ambiente (ambos son productos de deshecho de la vida animal) y recombinan los agregados de carbono, hidrógeno y oxígeno, más los de algunas sales minerales, dando compuestos «orgánicos» más complejos que tienen una gran energía «potencial» química incorporada en su estructura la cual puede liberarse posteriormente en el interior del cuerpo animal durante la descomposición. Para que exista una buena coordinación, la planta libera también oxígeno a la atmósfera mientras forma nuestro alimento.

Por cada gramo de contenido de carbono, estos «combustibles» liberan, aproximadamente, 10^4 cal en forma de trabajo y calor, y de ello depende la vida de todos los animales, excepto la de algunos organismos inferiores que viven por fermentación. Pero, ¿no es esto una contradicción del principio de conservación de la energía? ¿No es esta actividad completa de animales y plantas del mundo un ejemplo de *movimiento perpetuo* (manteniéndose indefinidamente sin necesidad de ener-

gía)? La contestación es que «no», porque la energía almacenada en los compuestos orgánicos producidos en las plantas viene de la energía solar absorbida por éstas. Las reacciones dependen de la disponibilidad de energía lumínica (y de la presencia de clorofila y otros catalizadores) a esto se le llama técnicamente *fotosíntesis*. En este sentido, todos nuestros alimentos son, en gran parte, luz solar.

Si no se comen, las plantas ricas en energía, expuestas al aire libre, pronto se descomponen en sus productos constituyentes originales; pero si se entierran, o si por cualquier otro procedimiento se mantienen aisladas de sufrir la oxidación, pueden convertirse en carbón o en algún otro combustible, después de lentas descomposiciones químicas que favorecen la retención de las materias ricas en carbono.

Origen del sistema solar. Un enigma famoso, al cual el principio de conservación de la energía, en su forma original, pareció dar solución inmediata, era de cómo el Sol podía emitir continuamente calor y luz en la fabulosa proporción de $3,8 \times 10^{26}$ joule/s o sea 9×10^{25} cal/s. Si esto se obtuviera quemando combustibles ordinarios o a través de otras reacciones químicas, no tendría explicación el hecho de que el Sol no se hubiera extinguido hace ya mucho tiempo. Mayer, Helmholtz y otros propusieron dos posibles hipótesis: 1) el Sol se está contrayendo lentamente, y la energía potencial gravitatoria que pierde de este modo, se convierte en energía radiante; y 2) el Sol está capturando continuamente cometas y meteoros, cuya energía cinética se convierte en calor y después en energía radiante. La primera hipótesis fue desechada cuando se calculó que el diámetro del Sol debía contraerse a razón de una parte en 10 000 cada 2000 años, para proporcionar radiación de la manera que lo hace, y esta velocidad de contracción es demasiado grande para dar cuenta de la larga historia de vida sobre la Tierra. Tampoco hay evidencia suficiente de la existencia de materia meteórica cerca del Sol para explicar la velocidad de emisión de energía, y así había que descartar también la segunda hipótesis. La hipótesis aceptada hoy día del origen de la energía solar es la de una serie de reacciones nucleares de fusión (véase sec. 30.9) que, evidentemente, no podían imaginarse hasta hace muy poco. La idea fundamental de las hipótesis de Mayer y Helmholtz son útiles, sin embargo, para otros problemas, pues el mecanismo general de conservación de energía potencial gravitatoria en calor se invoca, hoy en día, en las teorías relativas a la creación del sistema solar.

Entre los hechos a explicar se cuentan los siguientes: 1) Al menos la mitad de las estrellas de nuestra galaxia son binarias (estrellas dobles) o estrellas de mayor multiplicidad, y muchas de ellas giran rápidamente una alrededor de la otra. 2) De las estrellas simples, aquellas de temperaturas más elevadas giran sobre su propio eje a velocidades enormes, en tanto que las «más frías», como nuestro propio Sol, lo hacen muy lentamente. 3) En nuestro sistema solar, todos los planetas giran en el mismo sentido alrededor del Sol y sus órbitas se encuentran, prácticamente, en un mismo plano; el momento cinético* de los planetas respecto al Sol es muy su-

* Véase nota al pie de página, en la sección 17.6.

perior al de este astro respecto a su propio eje. Las teorías actuales, aunque difieren en la explicación de los detalles, todas admiten que el sistema solar comenzó por la condensación de una delgada nube de polvo finamente dispersa, como las nubes de polvo cósmico de los espacios interestelares que pueden observarse con nuestros telescopios. Pudiera ser que la presión de la radiación de algunas estrellas de los alrededores impeliese las partículas y las colocase unas a la sombra de las otras hasta que la densidad fuese suficiente para que sus atracciones gravitatorias fueran las fuerzas predominantes.

Los cálculos indican que esta masa debió tardar, en conjuntarse, alrededor de 10^9 años. A medida que la nube se contrae, cualquier movimiento inicial de rotación, por lento que fuera, crecería progresivamente en virtud de la ley de conservación del momento cinético y, como las fuerzas gravitatorias atraen las partículas entre sí, se realiza trabajo y se engendra calor. De acuerdo con esta línea de pensamiento, en el estado final de este proceso la porción central de la nube se concentraría en una estrella central (o en dos o más) brillante y en giro sobre sí misma separándose del resto, que todavía se mantiene en giro y que, por condensación, daría lugar a los planetas y satélites.

Aunque este esquema parece explicar la dirección y el plano de las órbitas planetarias, la rotación de los planetas y sus satélites y la distribución general del momento cinético, aún pueden presentarse ciertos detalles como objeciones teóricas, y por esto se ha avanzado un esquema modificado, que también tiene sus críticas adversas. Puede imaginarse toda la nube de polvo inicial contrayéndose en una única estrella, de giro muy rápido. Eventualmente, la rapidez con que gira llega a ser tan grande que se rompe en dos (o más) fragmentos; o bien, la estrella llega a alcanzar tal temperatura, que se originan reacciones nucleares que la hacen explotar como una «bomba atómica» (*supernova*). La explosión puede también separar la estrella original en dos o más estrellas. Cualquiera que sea el mecanismo de separación, las estrellas dobles o múltiples siguen girando muy próximas con bastante rapidez, pero disipan su energía y entregan su momento cinético al polvo y los despojos que las rodean. En este proceso se va frenando la rotación de las estrellas dobles, con lo que se van uniendo una vez más por atracción gravitatoria mutua, girando ahora lentamente como si fuera un solo sol «más frío», mientras que el resto del medio que rodea a éste se concentra formando planetas y satélites. Evidentemente, este esquema ordena los diferentes tipos de estrellas en una secuencia evolutiva; e incidentalmente, da pie a especular que cada estrella que explote pueda convertirse en el origen de un sistema planetario. Sobre esta base, se ha estimado que el Universo conocido contiene, tal vez, cien mil millones de sistemas planetarios.

Desde el punto de vista científico actual, es natural pensar que nuestra Tierra, y todo lo que ella contiene, fue modelado por leyes que lo penetran todo y están actuando continuamente con consecuencias semejantes por todas partes. Aquí, como una llamada al poderoso e intrigante capítulo que la ley de conservación de la energía ha supuesto en la ciencia, no podemos renunciar a unas breves palabras

de comentario. Muy probablemente, llegará un día en que una u otra teoría demuestre que el origen y forma del sistema solar, incluidas las regularidades señaladas por la ley de Bode, son explicables por procesos físicos inmediatos. Pero si el pasado ha de servirnos de guía, algunos podrían interpretar este intento contrario a la Religión, pues se ha mantenido, generalmente, como axiomático que la Ciencia no podría proporcionar tal explicación para la que era necesaria una hipótesis teísta y que, realmente, la falta de una explicación científica debía interpretarse como una prueba de la existencia de Dios. Así, el mismo Newton, al descubrir los planetas y cometas, hacía notar en el «General Scholium», Libro III de los *Principia*:

«Pero, aunque estos cuerpos continuaran, realmente, en sus órbitas por las simples leyes de la gravedad, no habría medio de deducir el porqué de las posiciones regulares de las mismas órbitas, a partir de estas leyes. Los seis planetas primarios están girando alrededor del Sol (aproximadamente) en círculos concéntricos, con movimientos dirigidos en el mismo sentido y casi en el mismo plano. Las diez lunas están girando alrededor de la Tierra, Júpiter y Saturno, en círculos concéntricos con dichos planetas, en el mismo sentido y casi en los mismos planos de las órbitas de aquéllos; pero no es concebible que, simples causas mecánicas, den lugar a tantos movimientos regulares, puesto que los cometas recorren los cielos en órbitas muy excéntricas... Este sistema tan hermoso del Sol, los planetas y cometas, solamente puede proceder de la deliberación y poder de un Ser inteligente y poderoso...»

El mismo pensamiento existió en relación con el problema de los ascendientes del hombre antes de que fuera explicado por la evolución, con la existencia de los elementos químicos antes de que la física nuclear nos comenzara, recientemente, a explicar las prometedoras teorías de su génesis y con muchos otros ejemplos de este tipo. Pero esto debía enseñarnos que es insensato y blasfemo pensar que la creencia en Dios haya de basarse en una estimación prematura de lo que la ciencia *no* puede hacer. El camino opuesto, cual es la deificación de los descubrimientos de la Ciencia es, en verdad, igualmente precario, ya que la Ciencia cambia y puede llevarnos a considerar menos importante su viejo conocimiento. El fundamento firme de las creencias, según enseñaron todos los grandes fundadores de las religiones, no se encuentra en la capacidad de la mente humana, ni en las limitaciones de su imaginación, ni en el impresionante poder de las leyes de la Ciencia, ni en la supuesta inadecuación de estas leyes —sino en la fe.

Problemas adicionales

Problema 17.23 Antes de que Joule obtuviera un valor más exacto del equivalente mecánico del calor (J), escribió (1845): «Cualquiera de los lectores que hayan sido tan afortunados de residir en el escenario romántico de Gales o de Escocia, podría confirmar, sin duda, mis experimentos comprobando la temperatura del

agua en lo alto y en la base de una cascada. Si mis teorías son correctas, una caída de 817 pies producirá un grado (una elevación de temperatura de 1°F , o $5/9^{\circ}\text{C}$)... y la temperatura del río Niágara se elevará $1/5$ de grado F por su caída de 160 pies.» (Él comprobó más tarde esta predicción general en caídas de agua desde gran altura en Suiza, mientras estaba en su luna de miel.) Calcular el valor del equivalente mecánico del calor con estos datos. Para pasar de una escala a otra de temperaturas, recordar que $0^{\circ}\text{C} = 32^{\circ}\text{F}$, y $100^{\circ}\text{C} = 212^{\circ}\text{F}$.

Problema 17.24 Una esfera de plomo de 1 kg (calor específico $0,03 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$) cae libremente desde una altura de 10 m y se para al chocar contra el suelo. a) ¿Cuál sería la mayor elevación de temperatura del plomo que podría esperarse? b) Citar algunas razones por las cuales la elevación de temperatura observada sea menor que la calculada.

Problema 17.25 a) Calcular la energía total de la Tierra en un punto de su órbita (E_p respecto al Sol, más $E_{c(\text{rev})}$ en su órbita y $E_{c(\text{rot})}$ alrededor de su eje). b) Conocido el tamaño y la excentricidad de la órbita elíptica de la Tierra ($e = 0,017$), determinar la diferencia que existe entre nuestra distancia real al Sol en el perihelio y en el afelio y, con este resultado, más el de la parte a), calcular la máxima diferencia de velocidad orbital.

Problema 17.26 En su libro ampliamente discutido *Mundos en colisión* (Macmillan, 1950), Immanuel Velikovsky mantiene que unos 1 500 años a. de C. el planeta Júpiter expulsó materia que en forma de cometa pasó junto a la Tierra; que el chaparrón subsiguiente de meteoritos que cayó sobre la Tierra detuvo su rotación, al menos durante un corto tiempo; que el propio cometa, eventualmente, giró hacia el planeta Venus y que, posteriormente, en el año 747 antes de Cristo y, de nuevo, en el 687 a. de C., «Marte originó una repetición de las primeras catástrofes a escala menor». Dada la masa y radio de la Tierra, así como su velocidad angular de rotación ($m_T = 5,98 \times 10^{27} \text{ g}$, $r = 6\,370 \text{ km}$, $\omega = 2\pi \text{ rad/día}$), determinar el momento cinético de la Tierra que debe cederse antes de que detenga su rotación y el que debe suministrarse para iniciar después dicha rotación. En el caso más favorable, los meteoritos caerían en el ecuador con incidencia rasante, desplazándose con una velocidad de casi 50 000 millas/hora relativa a la superficie de la Tierra. ¿Cuál sería la masa total, aproximada, de los meteoritos? ¿Cuál sería la energía cinética total de rotación aniquilada por la paralización de la Tierra y los meteoritos? ¿Qué pasaría con dicha energía, y cómo podría empezar, de nuevo, la rotación de la Tierra sin otra colisión? ¿Cómo podrían las fuerzas gravitatorias (y, por tanto, centrales) entre cuerpos esféricos, cambiar radical y súbitamente su estado de rota-

ción? ¿Qué ocurriría con los océanos y con la atmósfera si la Tierra detuviera su rotación según el mecanismo de Velikovsky?

Problema 17.27 Utilizar el principio de la conservación de la energía para explicar estas observaciones: a) Una muestra de sustancia radiactiva mantiene su temperatura ligeramente superior a la de sus alrededores. b) Cuando una masa de aire se eleva a gran altura, el vapor de agua que contiene puede congelarse. c) Cuando una batería genera energía eléctrica, ocurren descomposiciones químicas en los electrodos.

Problema 17.28 Releer las anotaciones de Joule y Helmholtz al final de la sección 17.9 y, a la luz de la evidencia de que se dispone, discutir su validez.

Textos recomendados para lecturas posteriores

S.C. Brown, *Count Rumford: Physicist Extraordinary*, Garden City, N.Y.: Doubleday Anchor Books, 1962.

Hermann von Helmholtz, «On the interaction of natural forces» y «On the conservation of force», traducido de las conferencias dadas en 1854 y 1862 en su *Popular Scientific Lectures*; edición de Dover, reimpresa de la edición de 1881.

James Prescott Joule, «On matter, living force, and heat» (Sobre la materia, fuerza viva y calor), conferencia pronunciada en 1847, reimpresa conjuntamente con artículos de Mayer y Helmholtz en S. G. Brush, *Kinetic Theory*, vol. 1, *The Nature of Gases and of Heat*, New York: Pergamon Press, 1965.

E. C. Kemble, *Physical Science*, capítulos 13 y 14.

Fuentes, interpretaciones y trabajos de referencia

A. C. Bell, *Christiaan Huygens and the Development of Science in the 17th Century*, London: Arnold, 1947.

S. C. Brown, *Benjamin Thompson, Count Rumford: Count Rumford on the Nature of Heat*, New York: Pergamon Press, 1967. Incluye extractos de sus escritos.

T. M. Brown, «Resource Letter EEC-1 on the Evolution of Energy Concepts from Galileo to Helmholtz», *American Journal of Physics*, vol. 33, nº 10 (octubre de 1965).

S. G. Brush, «The wave theory of heat: A forgotten stage in the transition from the caloric theory to thermodynamics», *British Journal for the History of Science*, volumen 5, págs. 145-167 (1970).

D. S. L. Cardwell, *From Watt to Clausius: The Rise of Thermodynamics in the Early Industrial Age*, Ithaca, N.Y.: Cornell University Press, 1971.

R. Dugas, *A History of Mechanics*, New York: Central Book Company, 1955.

R. Dugas, *Mechanics in the Seventeenth Century*, capítulo XIV.

Y. Elkana, «Helmholtz, "Kraft": An illustration of concepts in flux», *Historical Studies in the Physical Sciences*, vol. 2, págs. 263-298 (1970).

Y. Elkana, «The conservation of energy; a case of simultaneous discovery?» *Archives Internationales d'Histoire des Sciences*, vol. 23, págs. 31-60 (1970).

E. Hiebert, *Historical Roots of the Principle of Conservation of Energy*, Madison, Wisconsin: State Historical Society of Wisconsin, 1962.

A. Koslow, *The Changeless Order*, New York: Braziller, 1967. Extractos de los escritos de Leibniz, Joule, Helmholtz y otros sobre las leyes de la conservación.

T. S. Kuhn, «Energy conservation as an example of simultaneous discovery», páginas 321-356 en *Critical Problems in the History of Science* (editado por M. Clagett), Madison, Wisconsin: University of Wisconsin Press, 1959; reimpresso en *The Sociology of Science* (editado por B. Barber y W. Hirsch), New York: The Free Press of Glencoe, 1962.

Ernst Mach, *The Science of Mechanics*, págs. 443-440; *The History and Root of the Principle of Conservation of Energy*, traducido del alemán, Chicago: Open Court Publishing Co., 1911; «On the principle of the conservation of energy», en su *Popular Scientific Lectures*.

D. Roller, «The early development of the concepts of temperature and heat: the rise and decline of the caloric theory», págs. 117-214 en *Harvard Case Histories in Experimental Science* (editado por J. B. Conant), Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1948; también existe en forma de folleto independiente.

D. W. Theobald, *The Concept of Energy*, New York: Barnes and Noble, 1966.

Capítulo 18

Ley de disipación de la energía

En los tres últimos capítulos hemos visto cómo se establecieron las leyes de conservación de la masa, de la cantidad de movimiento y de la energía. Con ciertas modificaciones, tales como la posibilidad de conversiones mutuas entre masa y energía, estas leyes todavía se consideran válidas. Tomadas en conjunto, parecen, simplemente, confirmar una opinión común en el siglo XVII: que el Universo es una máquina perfecta cuyas partes nunca se desgastan y que nunca se detiene. En esta «máquina mundial» nada cambia, realmente, durante su marcha; las partes materiales que constituyen nuestro Universo sólo pueden realizar ciclos de movimientos simples o complejos, repetidos indefinidamente. Además, las leyes de Newton del movimiento no distinguen entre el pasado y el futuro: Cualquier secuencia de movimientos prevista por las leyes pueden, del mismo modo, realizarse en sentido opuesto.

Esta idea del mundo como máquina (o quizás como un dispositivo mecánico análogo a un reloj) no corresponde, realmente, a un punto de vista científico general sobre el mundo físico actual, ni a los hechos, si se observa cuidadosamente. Como el físico inglés William Thomson indicó en 1874, las leyes de Newton por sí solas no explican las razones por las cuales una situación determinada no puede obtenerse, en general, invirtiendo, simplemente, las velocidades de todos los átomos de un sistema:

«Si el movimiento de todas las partículas materiales del Universo se invirtiera en un determinado instante, el curso de la Naturaleza se invertiría también para siempre. La burbuja de espuma que estalla al pie de una cascada se reconstruiría y descendería yendo al agua; los movimientos térmicos reconcentrarían su energía y lanzarían la masa de agua hacia arriba en forma de gotas que se convertirían en una columna líquida ascendente. El calor engendrado por fricción de los sólidos y

disipado por conducción o radiación con absorción volvería, de nuevo, al punto de contacto y lanzaría al cuerpo móvil en contra de la fuerza que, previamente, lo había engendrado. Los cantos rodados recuperarían del barro los materiales requeridos para tomar su forma previa y regresarían al pico de la montaña de donde habían sido arrancados. Y si la teoría materialista de la vida fuese cierta, los seres vivos regresarían al pasado con conocimiento consciente del futuro, pero sin memoria del pasado, y volverían al punto justo de su nacimiento. Sin embargo, los fenómenos reales de la vida trascienden infinitamente la ciencia humana; y las especulaciones respecto a las consecuencias de su reversibilidad son, desde luego, poco aprovechables.»*

La declinación gradual de la idea de la máquina mundial en la ciencia moderna ha seguido un largo y complicado proceso que todavía no ha terminado y que no podemos describir por completo en este libro (entre otras cosas exige el desarrollo de la biología evolucionaria). No obstante, en este capítulo indicaremos, al menos, un principio que en el siglo XIX se agregó al sistema de leyes físicas y que arroja una luz distinta sobre la idea de conservación: el *principio de disipación de la energía*, conocido, a veces, por el nombre de *segundo principio de la termodinámica*.

18.1 Newton rechaza la «máquina newtoniana del mundo»

Una de las ironías de la historia de la ciencia es que el hombre cuyos trabajos habían contribuido a establecer, hasta el siglo XIX, la idea de que el mundo es como una máquina o un reloj, fuese, al propio tiempo, el más entusiasta en rechazar aquella idea. Newton exponía en su *Opticks* (capítulo 31) las consecuencias de adoptar un principio de cantidad de movimiento vectorial en un mundo en el que los choques no son siempre elásticos (véase sección 16.2):

«Por razón de la ... debilidad de la elasticidad en los sólidos, es mucho más fácil que el movimiento se pierda que no que se gane, por lo que tenderá a decaer. Aquellos cuerpos que son absolutamente duros o tan blandos que carecen de elasticidad, no dan lugar a rebotes entre sí. La impenetrabilidad sólo les permite detenerse. Si dos cuerpos iguales se encuentran directamente en el vacío, en virtud de las leyes del movimiento se detendrán al encontrarse y perderán su movimiento quedando en reposo, a menos que sean elásticos y reciban, por ello, un nuevo movimiento. Si tienen la elasticidad suficiente para rebotar un cuarto, una mitad o tres cuartos de la fuerza que les impulsó uno contra otro, perderán tres cuartos, la mitad o un cuarto de su movimiento... Observando, por tanto, que la variedad de mo-

* William Thomson, *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, vol. 8, pág. 325 (1874).

vimiento que encontramos en el mundo decrece siempre, resulta necesario conservarlo y reclutarlo por principios activos tales como la causa de la gravedad, que mantiene los planetas y los cometas en sus órbitas y hace que los cuerpos adquieran un gran movimiento al caer; y la causa de la fermentación, por la cual el corazón y la sangre de los animales se mantienen en perpetuo movimiento y calor; las partes interiores de la Tierra están, constantemente, calientes y algunas incandescentes; los cuerpos se queman y brillan, las montañas toman fuego, se forman las cavernas en la Tierra y el Sol continúa violentamente incandescente y luminoso y calienta todas las cosas con su luz. Aparte de lo que es debido a estos principios activos, encontramos muy poco movimiento en el mundo. Y si no fuera por estos principios, los cuerpos de la Tierra, planetas, cometas, Sol y todas las cosas en ellos contenidas se enfriarían y congelarían y se convertirían en masas inactivas; y toda la putrefacción, generación, vegetación y vida cesaría y los planetas y cometas no permanecerían en sus órbitas.»

Newton parece argüir aquí que la continua disipación de movimiento en el mundo —que tendría lugar a pesar de la ley de conservación de la cantidad de movimiento— es, o debe ser, contrarrestada, de algún modo, por el efecto de los «principios activos». Resulta tentador interpretar la frase misteriosa «los principios activos» como una sugerencia del papel de la *energía* en el Universo; sin embargo, el significado y contexto del argumento de Newton no apoya la hipótesis de que la operación continuada del sistema dependiese simplemente de la conservación de la energía. Ciertamente, en una primera edición de *Opticks* aparece la frase «lo cual es debido a estos principios activos o al dictado de una voluntad» pero fue modificada en la edición de 1717 (quizás como resultado de las críticas que se mencionan luego), que dice «lo cual es debido a estos principios activos», como en la cita anterior.

Una indicación posterior de la resistencia de Newton a aceptar que sus leyes del movimiento garantizarían la existencia de una máquina eterna del mundo viene dada en otro pasaje del mismo trabajo:

«Pues mientras los cometas se mueven en órbitas muy excéntricas en todo tipo de posiciones, el destino ciego no podría hacer que los planetas se moviesen del mismo modo en órbitas concéntricas, exceptuando algunas irregularidades no importantes que surgen de las acciones mutuas de cometas y planetas y que podrán aumentar, hasta que este sistema necesite una reforma.»

¿Cuál sería la «reforma»? ¿Un acto milagroso de Dios, volviendo a situar los cometas y planetas en sus propias órbitas, de las cuales habían sido apartados? Cualquier sugerencia de la necesidad de una divina intervención hubiera puesto en duda la eficacia de las leyes del movimiento para mantener la máquina del mundo en un orden de trabajo perfecto. Newton fue desafiado directamente sobre este punto por Leibniz, el filósofo científico alemán, quien había desarrollado, previamente, la teo-

ría de la *vis viva* (sec. 17.1) y quien había inventado el cálculo independientemente de Newton. En una carta (pronto hecha pública) a Carolina, princesa de Gales, en 1715, Leibniz se lamentaba de que Newton y su amigo, el filósofo John Locke, estaban socavando la creencia en Dios y el espíritu. Él decía:

«Sir Isaac Newton y sus seguidores tienen también una opinión muy extraña respecto al trabajo de Dios. De acuerdo con su doctrina, el Dios todopoderoso necesita dar cuerda a su reloj de vez en cuando; de otro modo cesaría el movimiento. Él no tenía, al parecer, suficiente previsión para conseguir un movimiento perpetuo. No, la máquina de Dios es —según estos caballeros— tan imperfecta, que él está obligado a limpiarla y a repararla lo mismo que hace un relojero; y, en consecuencia, debe ser un operario poco diestro cuando se ve obligado a reparar su trabajo con tanta frecuencia. De acuerdo con mi opinión, en el mundo existe siempre la misma fuerza y vigor (energía), la cual simplemente pasa de una parte a otra de conformidad con las leyes de la Naturaleza y el orden previamente establecido...»*

En vez de responderle sin rodeos, Newton dictó sus respuestas a un joven teólogo, Samuel Clarke, quien había traducido previamente al latín la *Opticks* de Newton. Hablando así, a través de Clarke, rechazó la idea de una máquina del mundo que funcione eternamente sin intervención divina, junto con la sugerencia de Leibniz de que la ley de conservación de la energía es suficiente para explicar todos los fenómenos naturales. Decía que el relojero, cuyo objetivo fundamental fuese construir un reloj que funcionase perpetuamente sin necesidad de ajuste, no crearía las fuerzas y las leyes del movimiento que permitiesen el funcionamiento del reloj, sino que debería considerarlas como ya existentes. Sin embargo, como Dios —según Newton— «es Él mismo el autor y mantenedor de las fuerzas originales (del mundo) o potencias del movimiento», resulta:

«...no una disminución, sino la verdadera gloria de su obra, que nada se realiza sin su gobierno e inspección continua. La noción de una gran máquina del mundo que funcione sin la intervención de Dios, al igual que un reloj funciona sin la ayuda de un relojero, es la noción de materialismo y hado y tiende (con el pretexto de hacer de Dios una inteligencia sobrenatural) a excluir la providencia y el gobierno de Dios del mundo.»

Así, la teoría del Universo como un reloj, lejos de ayudar a la creencia de Dios, como Robert Boyle, Leibniz y otros pretendieron, estaba conduciendo, en su lugar, al ateísmo. Los escépticos (como Newton predicaba) podían, fácilmente, situar la

* H. G. Alexander, *The Leibniz-Clarke Correspondance*, Manchester: Manchester University Press (1956), págs. 11-12.

creación del Universo —el primero y último acto de Dios— cada vez más atrás en el tiempo y llegar a la conclusión de que el Universo *siempre* ha existido en la forma actual.

Cuando el sistema de Newton del mundo fue desarrollado, posteriormente, por los científicos europeos del siglo XVIII y principios del XIX (especialmente Euler y los matemáticos franceses Lagrange, Laplace y Poisson), pareció que la inestabilidad prevista por Newton de las interacciones mutuas gravitatorias de cometas y planetas no debería ocurrir; estas interacciones simplemente darían lugar a que las distancias medias de los planetas al Sol oscilasen periódicamente dentro de límites finitos. Así, como Newton había temido, la necesidad de una intervención divina o guía para mantener el sistema marchando suavemente, parecía desaparecer. Según la leyenda, cuando Napoleón examinó la obra maestra de Laplace: *Mecánica celeste*, le dijo a su autor que en todo el libro no había encontrado ninguna mención a Dios; a lo cual Laplace respondió: «¡Señor, no he tenido necesidad de tal hipótesis!» La idea de la máquina del mundo había triunfado (al menos en aquellos tiempos); y parecía quedar establecido que las leyes de Newton por sí mismas garantizaban la estabilidad del sistema solar por períodos de tiempo indefinidamente largos, tanto en el pasado como en el futuro.

18.2 El problema del enfriamiento de la Tierra

Aunque los éxitos de la teoría planetaria de Newton parecían conducir, convincentemente, a la idea del mundo como una máquina, las especulaciones sobre el interior de la Tierra en el siglo XVIII y principios del XIX dieron origen a otro punto de vista. Por ello debemos aventurarnos, brevemente, en la geofísica, una importante —aunque, a veces, olvidada— parte de la física.

Muchos escritores, en siglos anteriores habían sugerido que la Tierra se formó, originalmente, en un estado fundido incandescente y que después se enfrió solidificándose, al menos, su superficie. Leibniz expuso en 1693 su teoría arguyendo que muchas de las rocas encontradas en la superficie de la Tierra parecían haber sido formadas por la acción del fuego que podía seguir ardiendo en el interior de la Tierra. El gran naturalista francés Buffon (1707-1788) sugería que el descubrimiento de colmillos de marfil de elefantes en las regiones polares, donde estos animales ahora no podrían sobrevivir, apoya la idea de que la superficie de la Tierra estuvo en algún tiempo más cálida. Buffon también realizó una serie de experimentos sobre el enfriamiento de esferas de hierro y otras sustancias a fin de estimar el tiempo necesario para que la Tierra alcanzase su temperatura actual a partir del estado de fusión postulado; su resultado final era de 75 000 años. Aunque esta cifra es extraordinariamente pequeña a la luz de los conocimientos del siglo XX, pareció a sus contemporáneos sorprendentemente elevada, pues éstos creían que la cronología de

la Biblia fijaba la creación del Universo en un intervalo de tiempo de unos pocos miles de años.

Según la teoría del calor central de la Tierra y su gradual enfriamiento, era inmediata la conjetura de que todos los cuerpos del Universo estaban enfriándose y llegarían a enfriarse tanto, que la vida sería imposible. Este hecho parece ser que fue citado explícitamente por vez primera por el astrónomo francés Jean-Sylvain Bailly (1736-1793) en sus escritos sobre la historia de la astronomía. De acuerdo con Bailly, todos los planetas deben tener calor interno y se encuentran ahora en alguna etapa particular de enfriamiento; Júpiter, por ejemplo, está todavía demasiado caliente para que la vida se inicie durante varios miles de años; la Luna, por el contrario, está ya demasiado fría. Sin embargo, Bailly predice que con el tiempo todos los cuerpos alcanzarán un estado final de equilibrio en el cual cesará todo movimiento.

James Hutton (1726-1797), uno de los fundadores de la ciencia geológica en Inglaterra, aceptó la hipótesis de que el interior de la Tierra está ahora mucho más caliente que la superficie, como una explicación conveniente para los volcanes y termas, pero no creía en enfriamientos durante épocas pasadas. En su *Teoría de la Tierra* (1795) escribió que el «fuego subterráneo había existido previamente y siempre desde la formación de esta Tierra», pero también que «existe con todo su vigor en este día». Hutton propuso un esquema cíclico de la historia de la Tierra con períodos de erosión que conducían a la destrucción de montañas e, incluso, continentes enteros, seguidos de la consolidación de sedimentos y erección de nuevos continentes (potenciados por los fuegos subterráneos). El discípulo de Hutton, John Playfair, explicaba este punto de vista cíclico en un libro ampliamente leído: *Ilustraciones de la teoría de Hutton sobre la Tierra* (1802):

«La frecuencia con que se han repetido estas vicisitudes de destrucción y renovación no es posible determinarla: constituyen una serie que —como el autor de esta teoría ha remarcado— nosotros no podemos ver el principio ni el fin; circunstancia que está acorde con nuestro conocimiento sobre otras partes de la economía del mundo. En la continuación de las diferentes especies de animales y vegetales que habitan la Tierra, no discernimos el principio ni el fin; y en los movimientos planetarios, donde la geometría ha llevado el ojo del hombre, tan lejos en el futuro como en el pasado, no descubrimos ninguna marca del comienzo o del fin del orden establecido actualmente. No es razonable, por tanto, suponer que tales marcas deban existir en alguna parte. El Autor de la Naturaleza no ha dado leyes al Universo, las cuales, como las instituciones de los hombres, transportan en sí mismas los elementos de su propia destrucción. Él no ha permitido en sus trabajos síntomas de infantilismo ni de vejez, ni de cualquier signo por el cual podamos estimar cuál será su futuro o la duración de su pasado. Puede establecer un fin, ya que, sin duda, estableció un principio al sistema actual en algún período determinado; pero podemos llegar a la conclusión de que esta gran *catástrofe* no será debida a las

leyes ahora existentes y que no viene indicada por ninguna de las cosas que percibimos.»

En una nota complementaria, Playfair cita las investigaciones matemáticas de Lagrange y Laplace, las cuales han demostrado que «todas las variaciones de nuestro sistema (solar) son periódicas; que están confinadas dentro de ciertos límites; y consisten en una disminución y un incremento alternados... El sistema está así provisto de una estabilidad que puede resistir una duración ilimitada; sólo puede perecer por una causa externa y por la introducción de leyes cuyo vestigio no ha sido descubierto hasta ahora». El propio sistema de Hutton tiene la misma estabilidad; ambos sistemas —indicaba Playfair— son como las máquinas diseñadas por una inteligencia superior.

El principio de que los fenómenos geológicos han de explicarse utilizando sólo las leyes y procesos físicos que *ahora* pueden observarse —en oposición a los sucesos catastróficos postulados en el pasado, como el Diluvio Universal— se conoció con el nombre de *uniformismo*. Este principio fue utilizado por Sir Charles Lyell (1797-1875) en su gran síntesis del conocimiento geológico, publicado por vez primera en 1830, que proporcionó una base para la mayor parte de la especulación geológica hasta el siglo XX. Aunque el *uniformismo* fue una herramienta esencial del movimiento hacia la geología como una ciencia independiente del dogma teológico, algunos científicos del siglo XIX lo criticaron por ser, en sí mismo, un dogma incompatible con las leyes de la física. En particular, Lyell rehusó aceptar la teoría de que la Tierra estuvo, en principio, en estado de fusión y de que se había enfriado perdiendo calor; esto implicaría que algunos procesos geológicos habían sido mucho más intensos en el pasado lejano que en el presente.

Entretanto, la teoría del enfriamiento de la Tierra había sido puesta en base cuantitativa por el matemático francés Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830). Impulsado, en su origen, por el problema de las temperaturas terrestres, Fourier había desarrollado una teoría de la conducción del calor en sólidos, junto con un método poderoso para resolver las ecuaciones que surgen en la teoría. Tanto la teoría general de la conducción del calor como el método de resolver sus ecuaciones (expresando una función matemática arbitraria, como suma de una serie infinita de funciones trigonométricas) han tenido un impacto enorme en la física teórica moderna. Aunque el tema no puede tratarse aquí, debe destacarse un hecho significativo: la ecuación de la conducción del calor de Fourier, al contrario que las leyes del movimiento de Newton, es *irreversible* respecto al tiempo. *Esta ecuación postula que siempre que existan diferencias de temperatura, éstas tienden a desaparecer por causa de un flujo de calor que fluye de las altas a las bajas temperaturas*. Viceversa, la existencia de tales diferencias de temperaturas actualmente puede utilizarse para calcular las aún mayores diferencias de temperatura que existieron en el pasado.

Fourier utilizó su teoría para estudiar la historia térmica de la Tierra teniendo en cuenta las variaciones periódicas del calor recibido del Sol en distintos puntos

de la superficie, combinadas con una disminución lenta del calor interno de la Tierra. Utilizando medidas de la variación de temperatura que se observa a medida que se desciende en el interior de la Tierra en las minas, junto con estimaciones de la conductividad térmica de las rocas, Fourier calculó las temperaturas internas de la Tierra en tiempos anteriores. Llegó a la conclusión de que la teoría de un núcleo incandescente, que gradualmente se enfría, es compatible con los datos disponibles, aunque en recientes épocas geológicas la temperatura del interior no ha tenido un efecto significativo en la temperatura de la superficie de la Tierra.

Una teoría más completa fue desarrollada por William Hopkins, geofísico inglés, que fue también conocido como brillante profesor de matemáticas en la universidad de Cambridge. Hopkins decía, en 1839, que cuando una esfera líquida incandescente se enfría, no empieza a solidificarse, necesariamente, por el exterior, aunque sea ésta la parte más directamente expuesta a las menores temperaturas del espacio que le rodea. Para una esfera del tamaño de la Tierra, el peso de las capas externas produce enormes presiones en el interior, y estas presiones pueden producir solidificación incluso a temperaturas muy superiores al punto normal de fusión de la sustancia. En 1842 Hopkins publicó un estudio elaborado matemáticamente del efecto que una Tierra parcialmente fluida podía tener sobre el movimiento de la Luna, llegando así a la conclusión de que una porción, relativamente grande, del interior de la Tierra debe ser sólida. Proponía que el núcleo central de la Tierra es sólido y que entre este núcleo y la corteza, relativamente gruesa, existe una región líquida. De acuerdo con la teoría de Hopkins, los cambios del clima superficial se han producido por variaciones geológicas y no por enfriamiento del interior. Esta idea, que había sido propuesta, previamente, por Lyell, fue reforzada por la evidencia acumulada por el naturalista suizo-americano Louis Agassiz (1807-1873), que demostraba que la superficie terrestre había sido mucho *más fría* durante ciertas épocas pasadas que en la presente y que el cielo había cubierto partes enormes de los continentes.

Hopkins destacó el hecho de que si la superficie de la Tierra se calentó después de una Edad Glacial, las viejas teorías del enfriamiento de la misma no pueden proporcionar explicaciones adecuadas a la mayor parte de los fenómenos geológicos. Sin embargo, al mismo tiempo, mientras revisaba la situación en su mensaje presidencial a la Sociedad Geológica de Londres, en 1852, Hopkins reiteró el principio de que en periodos muy largos de tiempo el enfriamiento de la Tierra es importante e impone una irreversibilidad global o cambio progresivo en los fenómenos terrestres:

«Admito como cierto que si una porción de materia, como la Tierra con su agua y su atmósfera, se sitúa en un espacio cuya temperatura es inferior a la suya propia, experimentará, necesariamente, una pérdida de calor por radiación hasta que su temperatura se aproxime, finalmente, a la del espacio ambiente que la rodea a menos que esta reducción de temperatura sea anulada por la generación continua de calor.»

Además, la Tierra no puede eludir este destino postulando un flujo de radiación procedente del Sol y las estrellas que equilibre el calor que pierde, pues todo calor en el Universo debe estar sujeto a la tendencia general a circular de lo caliente a lo frío. Por esta razón, Hopkins insistía: «Yo soy incapaz de reconocer el sello y la muestra de la eternidad estampada en el Universo físico»; el Universo debe estar gobernado por esta ley general de la igualación de temperaturas que le dirige irreversiblemente hacia un límite último, el frío del espacio exterior.

18.3 El segundo principio de la termodinámica y la disipación de la energía

El enunciado de Hopkins del principio del flujo térmico irreversible en los procesos geológicos no atrajo mucha atención fuera de la audiencia de los geólogos a quienes iba dirigido, pero en el mismo año (1852), William Thomson (1824-1907) —más tarde Lord Kelvin— enunció un principio de irreversibilidad más general.* Para entender las bases del principio de Thomson, debemos volver al origen de la termodinámica en el análisis de las máquinas de vapor.

En 1824, un joven ingeniero francés (Sadi Carnot) publicó un pequeño libro titulado *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego*, en el cual hacía la siguiente pregunta: ¿Cuál es el máximo *beneficio* de una máquina? (El *beneficio* de una máquina se definía por la cantidad de trabajo mecánico que puede realizar a partir de una determinada cantidad de combustible; está relacionado con el concepto de *rendimiento*.) Carnot utilizó la teoría del calórico en su análisis de las máquinas de vapor; suponía que el calor no se convierte, realmente, en trabajo, sino que el flujo de calor de un cuerpo caliente a un cuerpo frío puede utilizarse para *realizar* trabajo de un modo parecido a como se aprovecha la caída de agua de un nivel elevado a otro más bajo. Aunque la teoría del calórico —sobre la que se basaron estos resultados— fue rechazada posteriormente por otros científicos (e, incluso, por el propio Carnot en notas que permanecieron sin publicar hasta 1878), sus conclusiones son todavía válidas. Descubrió que existe un valor máximo del beneficio, es decir, un límite superior de la cantidad de trabajo que puede obtenerse de una cierta cantidad de calor en una máquina, y este límite no puede excederse, cualquiera que sea la sustancia —vapor, aire u otra cosa— utilizada en la misma.

Más significativa que la existencia de este límite máximo es la conclusión de Carnot de que todas las máquinas reales son incapaces de alcanzar en la práctica este límite superior. La razón es que siempre que existe una diferencia de temperatura entre dos cuerpos, o dos partes del mismo cuerpo, hay la *posibilidad* de rea-

* Thomson fue uno de los físicos teóricos sobresalientes que habían sido tutelados en matemáticas por Hopkins, en Cambridge; su interés por las aplicaciones geofísicas fue reforzado por esta asociación.

lizar trabajo haciendo que el calor expandiese un gas en el proceso de paso del calor de un cuerpo al otro. Pero si el calor fluye por sí mismo de un cuerpo caliente a otro frío y no diseñamos apropiadamente nuestra máquina, perderemos la oportunidad de realizar el trabajo que podría haberse realizado.

El análisis de Carnot de las máquinas de vapor muestra que el proceso de igualación de temperaturas por el flujo de calor de los cuerpos calientes a los fríos tiene lugar constantemente no sólo en las máquinas, sino en toda la Naturaleza, y que esta igualación representa una pérdida de la posibilidad de realizar trabajo mecánico. Esto es lo que significamos al decir que aquella energía se ha «disipado» (*la cantidad total de energía de un sistema cerrado —el Universo, por ejemplo— es siempre la misma, pero tiende a transformarse en formas de la energía, cada vez menos utilizables*).

Después del descubrimiento de la ley de conservación de la energía (capítulo 17), las conclusiones de Carnot sobre las máquinas de vapor fueron incorporadas a las nuevas teorías del calor con el nombre de segundo principio de la termodinámica. Esta ley se ha establecido de diversas formas, todas ellas aproximadamente equivalentes, y expresa la idea de que *la tendencia del flujo de calor de los cuerpos calientes a los fríos hace imposible obtener la cantidad máxima de trabajo mecánico a partir de una determinada cantidad de calor*.

Cuando William Thomson en 1852 afirmó la existencia de una «tendencia universal en la Naturaleza a la disipación de la energía mecánica» se apoyaba, fundamentalmente, en el principio de Carnot. Sin embargo, llegó también a la conclusión de que «dentro de un tiempo ya transcurrido, la Tierra debe haber sido —y en el futuro volverá a serlo— desajustada por la presencia del hombre...» Thomson estaba especialmente interesado por la teoría de una Tierra incandescente en el pasado y muy fría en el futuro, pues fue uno de los primeros científicos ingleses en asimilar la teoría de Fourier de la conducción del calor y sus aplicaciones geofísicas.

En la década 1860-1870 Thomson llegó a la conclusión de que la Tierra debió requerir un período de 100 a 200 millones de años para alcanzar su estado actual, supuesta inicialmente a una temperatura de 4 000 a 6 000 °C. Con anterioridad, la temperatura de la superficie estaría por encima de los puntos de fusión de todas las rocas conocidas. Al mismo tiempo estimaba que el Sol no podía haber estado iluminando la Tierra durante un tiempo superior a varios cientos de millones de años, suponiendo que su fuente de energía estuviera limitada a las ya conocidas en el siglo XIX (fundamentalmente, contracción gravitatoria).

Sin embargo, estas conclusiones parecían incompatibles con las afirmaciones de los geólogos *uniformistas* de que aquellos procesos, como la erosión, continuaban al mismo ritmo durante cientos de millones de años, y que la historia de la Tierra es, esencialmente, cíclica sin cambios a largo plazo (véase sec. 18.2). Thomson decía que los principios básicos del «uniformismo» geológico eran contrarios a las leyes establecidas de la física, en particular al segundo principio de la termodinámica y a la teoría de Fourier de la conducción del calor.

El ataque de Thomson a los geólogos fue también, indirectamente, un ataque a la teoría de Charles Darwin de la evolución, pues en su *Origen de las especies* (1859), Darwin hacía la conjetura, en apoyo de su hipótesis, de la necesidad de tiempos suficientemente largos para la selección natural, de que ciertos procesos geológicos persistieron durante 300 millones de años. Como tales observaciones podían hacer suponer que la teoría de la evolución dependía de la existencia continuada de condiciones favorables a la vida durante cientos de millones de años, Darwin dio a sus oponentes un nuevo argumento: Tales periodos de tiempo no fueron considerados aceptables o significativos por algunos físicos, tales como Thomson.

El debate entre William Thomson (apoyado por otros físicos) y los geólogos «uniformistas» continuó durante el resto del siglo XIX. El *problema de la edad de la Tierra*, como se venía llamando, planteaba un amargo conflicto entre la geología y la física, en donde cada bando afirmaba que su propia evidencia no podía ser ignorada, simplemente, porque resultaba incompatible con la del otro bando. Gracias al prestigio de los físicos, debido a éxitos anteriores, los geólogos se vieron forzados a revisar sus estimaciones sobre la velocidad de los procesos geológicos a fin de ajustarse a la escala de tiempo más corta que requerían los cálculos de Thomson. Los defensores de la evolución de Darwin trataron de desviar el ataque de Thomson señalando que la validez de la teoría evolucionista no dependía de ninguna escala particular de tiempos; como no se conocía ninguna medida definida de la velocidad de variación de la evolución, incluso 10 millones de años podían ser suficientes.

A comienzos del siglo XX la situación cambió radicalmente por una razón que ni los físicos ni los geólogos podían haber anticipado: el descubrimiento de la radiactividad. Cuando Marie y Pierre Curie aislaron el nuevo elemento (radio) de muestras de rocas, se comprobó que el calor engendrado por radiactividad en el interior de la Tierra debe tenerse en cuenta en cualquier cálculo de la velocidad de enfriamiento y fácilmente podía bastar para compensar la mayor parte o todo el calor perdido por conducción a través de la corteza. Las conclusiones de Thomson no eran, por tanto, válidas, pues había supuesto, incorrectamente, que no había fuentes de calor en el interior de la Tierra.

Una refutación más directa todavía de sus resultados vino de un análisis más detallado del proceso de desintegración radiactiva (véase cap 27). Las medidas de las proporciones relativas de plomo, helio, radio y uranio en las rocas podían utilizarse para estimar las «edades» (tiempo transcurrido desde su solidificación) de estas rocas. Los primeros resultados de esta técnica radiactiva sugerían que la corteza sólida de la Tierra tenía, aproximadamente, 3 000 millones de años: un valor diez veces mayor que el de Darwin (300 millones de años), ¡y que a Thomson le había parecido demasiado elevado!

La evolución, el enfriamiento de la Tierra y la radiactividad son fenómenos que caen fuera del marco nítido de la física de Newton. Son procesos *progresivos* o *irreversibles*, pero no *cíclicos*. El fracaso de la teoría de Thomson no prueba,

de modo alguno, que las teorías físicas no puedan tratar los procesos irreversibles (es bastante fácil fijar su análisis introduciendo un término que incluya la fuente de calor en la ecuación de conducción de Fourier). Pero sugiere que el físico, acostumbrado a trabajar en experimentos de laboratorio y análisis matemático, tiene algo que aprender de aquellos científicos más experimentados en la observación e interpretación de los fenómenos naturales que tienen lugar en grandes intervalos de tiempo y espacio. La astronomía y las ciencias de la Tierra no deben considerarse, simplemente, campos en los que se aplican leyes físicas ya establecidas, sino más bien como fuentes posibles de nuevos descubrimientos y conceptos físicos.

18.4 Entropía y «muerte térmica»

Aunque las estimaciones cuantitativas de Thomson acerca de la edad de la Tierra resultaron ser demasiado pequeñas, su principio cualitativo de la disipación de la energía no fue desechado. Hermann von Helmholtz, en una conferencia pronunciada en 1854, señaló que el principio de Thomson llevaba consigo el enfriamiento del Universo entero. Toda la energía llegaría a transformarse en calor a una temperatura uniforme y cesarían los procesos naturales; a partir de ese momento, «el Universo quedaría condenado a un estado de eterno reposo». Así se hacía explícito el concepto de *muerte térmica* del Universo, que un siglo antes había previsto Bailly, pero ahora con una base mucho más firme gracias a la nueva ciencia de la termodinámica.

Otro modo de enunciar el principio de disipación de la energía fue sugerido por el físico alemán Rudolf Clausius en 1865. Clausius había introducido, previamente, un nuevo concepto al que dio el nombre de *entropía*,* definido en función del calor transferido de un cuerpo a otro. De un modo más preciso definió la *variación* de entropía ΔS_1 resultante de una transferencia de calor H de un cuerpo 1 a la temperatura T_1 en la forma siguiente:

$$\Delta S_1 = -H/T_1,$$

en donde T_1 es la temperatura absoluta (véase sec. 19.3). Cuando la misma cantidad de calor se recibe por otro cuerpo 2, que se encuentra a la temperatura T_2 , la variación de entropía es

$$\Delta S_2 = +H/T_2.$$

* De las palabras griegas *ἐνέργεια* (energía) y *τροπή* (transformación). El concepto había sido utilizado desde 1854 con el confuso nombre de «valor de equivalencia de una transformación».

Si T_2 es menor que T_1 , la variación total de entropía $\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2$ será *positiva*. Esta variación sólo será nula si $T_1 = T_2$. (La cantidad total de entropía de un cuerpo no puede medirse directamente, pero, usualmente, se define de tal modo que $S = 0$ en el cero absoluto de temperatura, $T = 0$.)

Estas afirmaciones nos indican que la entropía total del sistema crece siempre que el calor fluye de un cuerpo caliente a otro frío. También crece siempre que la energía mecánica se transforma en energía interna (térmica), como ocurre en los choques inelásticos y en los procesos de rozamiento, ya que en estos casos un cuerpo absorbe calor y ningún otro cuerpo lo pierde.

Una definición más general de la entropía fue propuesta por el físico austriaco Ludwig Boltzmann en 1878. Según la definición de Boltzmann, la entropía depende de las probabilidades de las distribuciones moleculares, y puede variar aunque no haya flujo de calor, por ejemplo cuando el sistema se hace más aleatorio o desordenado (al batir un huevo o mezclar dos sustancias puras).

El principio de disipación de la energía (segundo principio generalizado de la termodinámica) puede enunciarse ahora de un modo muy simple: *La entropía de un sistema aislado siempre tiende a crecer*. En particular, esto significa que el calor no fluye, espontáneamente, de los cuerpos fríos a los calientes; una pelota dejada caer sobre el suelo no rebotará a mayor altura que su posición original convirtiendo calor en energía mecánica; y un huevo batido no se separará, espontáneamente, en la yema y la clara. Todos estos sucesos (y muchos otros) si tuvieran lugar, no violarían los principios de la mecánica de Newton; sin embargo, disminuirían la entropía de un sistema aislado y, por tanto, vienen prohibidos por el segundo principio de la termodinámica.

Clausius enunció los dos principios de la termodinámica en la forma siguiente:

- 1) La energía del Universo es constante.
- 2) La entropía del Universo tiende a un máximo.

Estas leyes se han comprobado directamente sólo en fenómenos terrestres y extenderlas al Universo completo requiere una aplicación atrevida de las reglas de razonamiento de Newton (secc. 9.3). Ciertamente, en las últimas décadas se han propuesto teorías de la evolución del Universo que violarían ambas leyes. Sin embargo, son tan útiles que, probablemente, continuarán aceptándose como hipótesis de trabajo hasta que se refuten definitivamente.

El segundo principio implica que el *tiempo* no es una variable matemática neutra en el mismo sentido que las coordenadas espaciales (x , y , z); posee un *sentido* definido —lo que se ha denominado «la flecha del tiempo»— que apunta del pasado al futuro. Esta afirmación deja de ser una trivialidad si reconocemos que no está asociada a las leyes del movimiento de Newton. Como decía William Thomson en la cita mencionada al comienzo del capítulo, es difícil imaginar un mundo en el

cual no fuera válido el segundo principio. En tal mundo nada impediría que se produjesen las inversiones descritas.

El segundo principio ganó considerable fama en la última mitad del siglo XIX; el concepto de una eventual «muerte térmica», del Universo ejercía una mórbida atracción sobre los escritores de divulgación popular y encajaba en el espíritu de pesimismo de *fin de siglo* que inundaba algunos sectores de la sociedad europea y americana. ¡Como el incremento de la entropía significa más aleatoriedad y desorden, quizás ésta era la explicación de la desintegración social y degradación del ambiente!

El historiador americano Henry Adams intentó reunir estas ideas en una serie de ensayos sobre la aplicación de la termodinámica a la historia del hombre. Citaba el enunciado de Thomson del principio de disipación de la energía, remarcando que «para el historiador vulgar e ignorante ello significaba sólo que el montón de ceniza crecía en tamaño». Si los historiadores fueran conscientes, como Adams pretendía, no sólo del pasado, sino también del futuro, difícilmente podrían ignorar los últimos resultados de la física, según los cuales la sociedad humana, junto con el Universo físico, debía terminar en degradación y muerte, incluso aun cuando esta profecía fuese del desagrado de los evolucionistas, predicadores constantes del progreso eterno. Adams se lamentaba de que la evolución, junto con la doctrina geológica del «uniformismo» de Lyell, había comenzado ya a tomar el lugar del dogma religioso y, «desde un punto de vista literario, la época victoriana descansaba ampliamente —quizás fundamentalmente— en la fe que tenía la sociedad, excepto en seguir a la ciencia... para alcanzar la perfección». Sin embargo, Adams encontraba numerosos ejemplos en los estudios antropológicos y en la prensa popular para confirmar la noción de que la raza humana iba de mal en peor y que pronto se extinguiría.*

Una interpretación más equilibrada del segundo principio queda aplazada hasta el capítulo 22, pero resulta ya evidente por qué el escritor C. P. Snow, en su famoso libro *Las dos culturas y la revolución científica*, decía que un humanista totalmente ignorante del segundo principio es algo tan sorprendente como un científico ignorante de las obras de Shakespeare.

Textos recomendados para lecturas posteriores

H. Butterfield, *The Origins of Modern Science*, capítulo 12.

R. Feynman, *The Character of Physical Law*, capítulo 5.

E. C. Kemble, *Physical Science*, capítulo 15.

* Henry Adams, *La degradación del dogma democrático* (ensayos publicados por vez primera entre 1894 y 1909).

Fuentes, interpretaciones y trabajos de referencia

F. D. Adams, *The Birth and Development of the Geological Sciences*, reimpresión de Dover de la edición de 1938; capítulos VII-XI.

Henry Adams, *The Degradation of the Democratic Dogma (La degradación del dogma democrático)*, New York: Capricorn Books (Putnam's), 1958, reimpresión de la edición de 1919. Tres ensayos sobre la aplicación de la termodinámica a la historia y una larga introducción de Brooks, hermano de Henry, sobre la situación de la familia Adams.

H. G. Alexander (editor), *The Leibniz-Clarke correspondence, with extracts from Newton's Principia and Opticks*, New York: Philosophical Library, 1956.

M. K. Barnett, «Sadi Carnot and the Second Law of Thermodynamics», *Osiris*, volumen 13, págs. 327-357 (1958).

S. G. Brush, «Thermodynamics and History», *The Graduate Journal*, vol. 7, páginas 477-565 (1967).

Sadi Carnot, *Reflections on the Motive Power of Fire, and Other Papers on the Second Law of Thermodynamics* by E. Clapeyron and R. Clausius (editado por E. Mendoza), New York: Dover Publications, 1960.

B. Gal-Or, «The crisis about the origin of irreversibility and time anisotropy», *Science*, vol. 176, págs. 11-17 (1972).

F. C. Haber, *The Age of the World from Moses to Darwin*, Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1959.

E. Hiebert, «The uses and abuses of thermodynamics in religion», *Daedalus*, Fall, 1966.

F. O. Koenig, «On the history of science and of the second law of thermodynamics», págs. 57-111 en *Men and Moments in the History of Science* (editado por H. M. Evans), Seattle: University of Washington Press, 1959.

D. Kubrin, «Newton and the cyclical cosmos: Providence and the mechanical philosophy», *Journal of the History of Ideas*, vol. 28, págs. 325-346 (1967).

S. Toulmin y J. Goodfield, *The Discovery of Time*, New York: Harper, 1965.

Parte F

Orígenes de la teoría atómica en la física y la química

19

La física de los gases

20

La teoría atómica de la química

21

El sistema periódico de los elementos

22

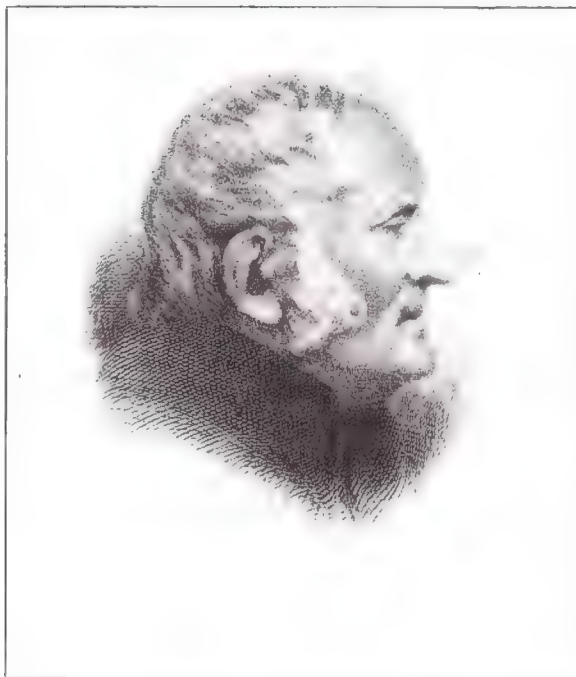
La teoría cinético-molecular de los gases

100

100

Orígenes de la teoría atómica en la física y la química

La historia del desarrollo y aceptación gradual en la ciencia de la teoría atómica de la materia es admirable por muchos aspectos (por sus orígenes, por la longitud y vigor de los debates, por la diversidad de hombres y campos que intervinieron, por la concurrencia —a menudo inesperada— de argumentos independientes, y por el flujo —siempre continuo— de consecuencias que han inundado todos los campos de estudio).



En esta sección trataremos del desarrollo de la teoría atómica hasta finales del siglo XIX. Retrospectivamente, está claro que el modelo atómico en aquel momento había surgido de la consideración de tres tipos de problemas: ¿Cuál es la estructura física de la materia, en particular, la de los gases? ¿Cuál es la naturaleza del calor? ¿Cuál es el fundamento de los fenómenos químicos? Aunque a primera vista estas tres cuestiones puedan parecer completamente independientes, la respuesta se obtuvo, simultáneamente, mediante una serie de conceptos *comunes* sobre la naturaleza del calor, los gases y las reacciones químicas, a partir de un esquema atómico cuantitativo. De hecho, la teoría atómica y la conservación de la energía eran conceptos íntimamente ligados, y en la lucha por el establecimiento de ambos intervienen los mismos protagonistas. Como en una fuga, se van introduciendo los distintos temas por separado, aproximándose unos a otros en el desarrollo, superponiéndose, creciendo también por separado, para terminar por reunirse en un todo.

Los conceptos y deducciones que encontraremos en esta historia no son siempre simples, pero es difícil encontrar un ejemplo mejor, a este nivel, para mostrar un esquema conceptual que surge de la labor de generaciones (exposición de observaciones experimentales ampliamente dispersas, hipótesis sutiles, aproximaciones simplificadoras, errores detectados, intuiciones penetrantes y aparato matemático). Y hay otras tres importantes razones de por qué un estudio detallado de esta materia puede ser útil: En primer lugar, nos dará un modelo importante, desde el punto de vista histórico, y de gran utilidad, de la estructura elemental de la materia. De este modelo, y de las sucesivas especulaciones que llevó consigo, surgió casi toda la física y química del período inmediatamente anterior al siglo XX, y sus fallos fueron el estímulo para el desarrollo de la mayor parte de la física actual. En segundo lugar, no sólo es la teoría cinética un lazo de unión entre las teorías físicas newtonianas y las contemporáneas, sino que conduce de la física del *macrocosmos* al mundo de los fenómenos *submicroscópicos*. Y, por último, esta materia nos introducirá —aunque por necesidad lo haremos de un modo esquemático— en otro tipo importante de leyes físicas que tratan con la *probabilidad* y discusión de una multitud de sucesos en lugar de la *certidumbre* y predicción de sucesos individuales.

Capítulo 19

La física de los gases

19.1 Naturaleza de los gases: primeros conceptos

Desde el tiempo de las primeras especulaciones filosóficas que se recuerdan, el hombre ha estado intrigado con un aspecto paradójico, relativo a la estructura de la materia. Por una parte, podemos con nuestras manos cortar o subdividir trozos de materia tan grandes como una roca o una cantidad de agua, en partes más y más pequeñas, hasta que la deficiencia de nuestros instrumentos, *pero nunca la misma materia*, nos obliga a detener la operación. Por consiguiente, podríamos concluir que la materia es infinitamente subdivisible. Por otra parte, nuestra imaginación no acepta así como así esta imagen y nos induce, fácilmente, a la suposición de otra hipótesis: que la subdivisión de cualquier trozo de materia, si se ha llevado suficientemente lejos, nos llevará a partículas que no pueden subdividirse o cortarse de nuevo.

Esta segunda hipótesis fue propuesta y desarrollada hace 2 400 años, en forma de una teoría atómica, por los filósofos griegos Leucipo y Demócrito, y extendida, posteriormente, por Epicuro. La materia —consideraban ellos— es, realmente, divisible más allá de la experiencia diaria, pero, en último término, consta de partículas indivisibles que no pueden cortarse y que, provisionalmente, podríamos llamar *corpúsculos o átomos*.*

El poeta romano Lucrecio, cuya obra *De rerum natura* citamos anteriormente en relación con la LCM, ejemplifica la enseñanza de aquellos trabajos originales griegos, hoy perdidos, y dio un resumen de su ciencia atomística que «marca la culminación del pensamiento científico romano» (Sarton), aunque hemos de observar, naturalmente, que este trabajo no debe considerarse primariamente como un texto científico.

* De la palabra griega *átomos* (indivisible).

Su tema fundamental es: «Toda la Naturaleza, tal como existe, se compone de dos cosas: los cuerpos, y el vacío en el cual estos cuerpos están situados y en cuyo seno se mueven...» La materia ordinaria se compone de estas dos realidades: lo sólido, en último término partículas, y el vacío. Notemos que por su propia definición estos átomos no son directamente perceptibles y hasta hace ciento cincuenta años existieron muy pocas consecuencias fructíferas y concretas deducidas de la hipótesis atómica que pudieran servir de confirmación experimental de esta idea desafiadora y especulativa. Incluso al principio de este siglo, cuando se había realizado una extensa confirmación de la utilidad de esta teoría, había importantes científicos que la rechazaban y no admitían el concepto de átomo.

Desde muy antiguo, las especulaciones relativas a la estructura de la materia, atrajeron la atención de importantes pensadores. Platón, Aristóteles y muchos otros de sus seguidores, rechazaron el atomismo, mientras que, de alguna forma, fue aceptado por Galileo, Gassendi, Bacon, Descartes, Newton, Leibniz y muchos de sus contemporáneos. Podemos especular con la idea de que las partículas pequeñas llegaron a ser más convincentes a consecuencia del trabajo de Newton, en el cual —como vimos— los postulados que conducen a la ley de gravitación universal indican que las *partículas* materiales son los agentes de la atracción mutua. Naturalmente, éstas no son, necesariamente, idénticas a las últimas partículas indivisibles o átomos. Sin embargo, el éxito grande del tratamiento de la gravitación en función de la mecánica de los pequeños cuerpos discretos es la clave de todos los fenómenos. El propio Newton escribió en la introducción de los *Principia*:

«Así, a partir de estas fuerzas (gravitatorias) y por otras proposiciones, que son también matemáticas, deduzco los movimientos de los planetas, los cometas, la Luna y el mar. Creo que podríamos deducir los restantes fenómenos de la Naturaleza por el mismo tipo de razonamiento a partir de principios mecánicos, pues estoy inducido a sospechar, por muchas razones, que todos ellos dependen de ciertas fuerzas por las cuales las partes pequeñas de los cuerpos... se atraen mutuamente entre sí agrupándose en figuras regulares, o bien se repelen y se separan unas de otras; al ser desconocidas estas fuerzas, los filósofos han intentado, hasta ahora en vano, la investigación de la Naturaleza, pero espero que los principios aquí establecidos arrojarán luz a estas cosas o a un método más real de la filosofía.»

Más tarde, en la *Opticks* (publicada en 1704) encontramos esta opinión vaga, todavía poco formada, sobre el atomismo:

«Considerando todas estas cosas, me parece probable que Dios al principio formó la materia sólida, masiva, dura, impenetrable, con partículas móviles, de tales dimensiones y forma, con tales propiedades y en tal proporción al espacio que mejor se ajustara al fin para el cual las había formado; y estas partículas primitivas, siendo sólidas, son incomparablemente más duras que cualquier cuerpo poroso com-

puesto de ellas. Y tan sumamente duras, que nunca pueden romperse en trozos; no existe ningún poder ordinario para dividir lo que el mismo Dios hizo al principio de la Creación... y, por esto, para que la Naturaleza pueda ser perdurable, los cambios de las cosas corporales tienen lugar solamente cuando se dan distintas separaciones, asociaciones y movimientos de estas partículas permanentes. Los cuerpos compuestos, o que pueden romperse, lo hacen no en las partículas sólidas, sino por las partes donde éstas se encuentran en contacto...

»Dios es capaz de crear partículas de materia de diversos tamaños y figuras y en proporción general al espacio que ocupan y, quizás, de densidades y fuerzas diferentes... Ahora, con la ayuda de estos principios, todas las cosas materiales parecen estar compuestas de las partículas duras y sólidas antes mencionadas, asociadas de distinto modo, desde el principio de la Creación, por voluntad de un agente inteligente. Por esto me parece que, quien las creó, las puso en orden. Y si esto es así, no tiene sentido filosófico buscar otro origen para el mundo o pretender que pudiera surgir del caos, por las simples leyes de la Naturaleza, aunque, una vez formado, pueda seguir rigiéndose por aquellas leyes durante muchos años.»

Una parte de la preocupación de Newton aquí es teológica, y esto por una razón histórica importante que no debemos pasar por alto si queremos comprender totalmente el desarrollo del punto de vista atomístico. Desde su comienzo, el atomismo había sido considerado ateo; como los extractos de Lucrecio (sección 15.1) indican, los primitivos atomistas confesaban abiertamente que el comportamiento de la materia y los fenómenos no podían explicarse por los designios impenetrables de un Creador y Ordenador omnipresente, sino a partir del comportamiento mecánico de los átomos constitutivos de los cuerpos materiales. En el siglo XVII, filósofos como Pierre Gassendi habían intentado eliminar la mancha de ateísmo proponiendo que los átomos no son corpúsculos animados, sino piezas inertes de materia que por la mano divina fueron puestos en movimiento a la creación del mundo. En la «filosofía mecánica», como defendió especialmente Robert Boyle en Inglaterra, Dios toma el papel de diseñador y creador de la máquina del mundo, la cual, una vez en movimiento, podía marchar a su placer sin una intervención activa; todos los sucesos observables podrían explicarse en última instancia por las configuraciones, dimensiones y formas de las partículas eternas, o por las leyes matemáticas de la fuerza y el movimiento.

Como hemos visto en el capítulo anterior, el propio Newton no aceptaba la versión extrema de la teoría de la máquina del mundo, la cual negaba que Dios tomara parte activa en el mundo físico. Sin embargo, la cita anterior de la *Ópticks* demuestra que, al formular los principios de su propio sistema del mundo, Newton se refería, básicamente, a los actos creativos iniciales de Dios de modo que en la práctica su sistema podía, fácilmente, interpretarse como una máquina del mundo.

Algunas otras observaciones de Newton sobre las propiedades de los átomos apoyaban a aquéllos que estaban disgustados con la filosofía mecanista defendida por

Descartes (sec. 6.1). Los cartesianos rechazaron la hipótesis de «acción a distancia», prefiriendo creer que todas las fuerzas, aparentemente de largo alcance, tales como la gravedad, podían explicarse por acciones de contacto propagadas a través de un medio material (el éter). Newton, aunque rechazó, en principio, la posibilidad de una acción real a distancia (véase su carta a Bentley, citada en la sec. 11.10), explicó muchos fenómenos en función de fuerzas atractivas y repulsivas que actuaban entre átomos. Estas observaciones alentaron a científicos como Bosovich y Priestley en el siglo XVIII a desarrollar una teoría atómica de la materia basada más en las fuerzas atractivas y repulsivas de los átomos que en su dureza e impenetrabilidad. El concepto del átomo como un centro puntual de fuerzas atractivas y repulsivas sobrevivió en el siglo XX junto con el concepto alternativo del átomo como bola de billar que interacciona por contacto con otras bolas de billar.

19.2 Presión del aire

La imagen atomística de la materia fue adquiriendo importancia con el tiempo, debido, en gran parte, a las investigaciones que se realizaban en un campo totalmente distinto, cual es el estudio de los gases.

Galileo, en su libro *Dos nuevas ciencias* (1638), decía que una bomba aspirante no podía elevar el agua a más de 10,5 m. Este hecho era bien conocido en la época en que Galileo escribió su libro; ya se usaban las bombas para sacar agua de los pozos para beber y para extraer agua de las minas inundadas y, por ello, su limitación era bien evidente a muchos trabajadores. Una consecuencia importante de la capacidad limitada de las bombas para elevar el agua fue la necesidad de emplear otros métodos en minas profundas, lo cual estimuló, inicialmente, el desarrollo de las máquinas de vapor, que permitían la extracción del agua en cubos. Otra consecuencia fue que los físicos del siglo XVII se sintieron deseosos de conocer la razón de por qué funcionaba la bomba aspirante y por qué su capacidad de elevar agua tenía un límite.

Si extraemos el aire de un recinto y creamos un vacío, existe una tendencia a succionar las cosas en su interior. Los filósofos partidarios de Aristóteles explicaban este hecho diciendo que la Naturaleza tiene horror al vacío. No es natural —decían— que el espacio esté vacío de materia y, por tanto, la materia se desplazará para llenar cualquier espacio vacío. Éste es un ejemplo de una explicación teleológica, basada en una «causa última» (otra sería: «la lluvia cae porque las cosechas necesitan agua»). Una de las metas básicas de la nueva filosofía mecanicista del siglo XVII fue eliminar esta explicación teleológica y explicar los fenómenos en función de causas físicas inmediatas. La teoría aristotélica parecía especialmente débil en este caso: Incluso si se acepta la afirmación de que la Naturaleza aborrece el vacío, resulta difícil explicar por qué este aborrecimiento es justamente suficiente para elevar el agua 10,5 m, ¡ni más, ni menos!

Evangelista Torricelli, alumno durante algún tiempo de Galileo, comprobó que la atmósfera ejercía una presión sobre la superficie de la Tierra y sospechó que esta presión del aire podía ser suficiente para explicar los fenómenos previamente atribuidos al horror al vacío de la Naturaleza. Tuvo la idea afortunada de pensar que el mercurio, líquido aproximadamente catorce veces más denso que el agua, podía convenir más que ésta para los experimentos de laboratorio; ciertamente, resultó que la misma bomba de vacío que podía elevar 10,5 m una columna de agua sólo elevaba el mercurio a 0,76 m.

Ni siquiera la bomba es necesaria para sostener una columna de líquido en el simple instrumento que se conoció con el nombre de *barómetro* de Torricelli. Se toma un tubo recto de vidrio de longitud algo mayor que 0,76 m, abierto por un extremo y cerrado por el otro; una cubeta; y suficiente mercurio para llenar el tubo y la cubeta. Se llena el tubo, se tapa el extremo abierto con el dedo, se invierte introduciendo éste en la cubeta y al retirar el dedo se ve que el mercurio desciende en el tubo hasta alcanzar una altura de, aproximadamente, 0,76 m sobre el nivel del mercurio en la cubeta. En la figura 19.1 puede verse el resultado (tubo de la izquierda). Se encuentra ahora que en la parte superior del tubo, por encima del mercurio, hay un espacio vacío. Torricelli repitió el mismo proceso con un tubo que tenía un gran bulbo en el extremo cerrado, con lo que permitía que existiera un espacio vacío de mayor tamaño en el que podrían fijarse pequeños objetos.

El anuncio de los experimentos de Torricelli en 1643 alentó a otros científicos (Otto von Guericke y Robert Boyle, entre ellos) a desarrollar mejores bombas de vacío para experimentar fenómenos en el vacío y para estudiar las propiedades de

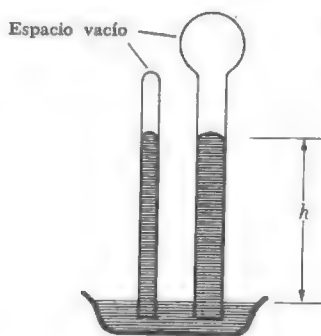


Fig. 19.1 Barómetro de Torricelli (dos formas). La columna de mercurio en cada tubo de vidrio vertical viene equilibrada por la presión de la atmósfera sobre la superficie libre del mercurio en la cubeta. Normalmente h vale, aproximadamente, 760 mm al nivel del mar.

los gases a bajas presiones.* Conectando una bomba a una vasija de vidrio, se podía preparar un *espacio experimental* en el cual estudiar el efecto sobre la luz, el sonido, y las fuerzas eléctricas y magnéticas, en atmósferas de distintos grados de enrarecimiento. Pesando el recipiente de vidrio, antes y después de evacuarlo, podría determinarse el peso del gas que contenía, e inversamente, utilizando una bomba de compresión, podría forzarse a un gas a entrar en un recipiente y realizar experimentos con presiones más elevadas.

De acuerdo con Torricelli y otros seguidores de la filosofía mecánica, la fuerza que mantiene la columna de mercurio en el tubo es simplemente la presión atmosférica transmitida a través del mercurio y, como prácticamente no hay gas en el espacio situado en la parte superior del tubo, el mercurio se eleva hasta que su peso es suficiente para equilibrar la fuerza ejercida por el aire exterior sobre la superficie superior de la cubeta de mercurio.

Obsérvese que la altura del mercurio en el tubo *no* depende del diámetro de éste ni del tamaño de la cubeta. Esto puede parecer extraño al principio, ya que la fuerza ejercida por el mercurio depende de su cantidad, es decir: del volumen total, y no precisamente de su altura. De igual modo la fuerza del aire exterior será mayor en una cubeta grande que en una pequeña. Sin embargo, el mercurio se eleva siempre a la misma altura, sea el tubo grueso o delgado, sea la cubeta grande o pequeña. Este hecho se explica si reconocemos que es el equilibrio de *presiones*, y no de *fuerzas*, el que determina la altura de la columna de mercurio (y, en general, el equilibrio de los fluidos).

Es importante distinguir claramente entre presión y fuerza. La presión se define como la cantidad de fuerza que actúa perpendicularmente a una superficie dividida por el área de la superficie:

$$P = F/A. \quad (19.1)$$

Una gran fuerza puede producir sólo una pequeña presión si se dispersa en un área bastante grande; por ejemplo, se puede pasear por la nieve sin hundirse si se utilizan como zapatos grandes raquetas. En cambio, una pequeña fuerza puede producir una gran presión si se concentra en un área pequeña; la moda de los tacones de aguja utilizados hace unos años en los zapatos femeninos daba lugar a deterioros frecuentes en suelos de madera y en alfombras, pues la presión ejercida por el tacón en el suelo —un área muy pequeña— puede ser tan grande ¡como la ejercida por el pie de un elefante!

* Estas bombas eran, relativamente, imperfectas y no producían lo que ahora llamamos un vacío. Todavía hoy es del todo imposible la eliminación total de toda traza de gas de una vasija cerrada. Sin embargo, los avances considerables en la construcción de bombas de vacío en la segunda mitad del siglo XIX hicieron posible la obtención de vacíos suficientes para permitir, por una parte, el descubrimiento de partículas subatómicas y, por otra, el desarrollo de la bombilla eléctrica de filamento incandescente.

Resulta instructivo calcular el valor numérico de la presión ejercida por la atmósfera, su magnitud, y ver por qué no depende del diámetro del tubo en el barómetro. La columna de mercurio tiene una altura de 0,76 m (valor medio de la columna barométrica al nivel del mar a 0°C). Si esta columna posee una sección recta de área 1 m², el volumen de la columna es de 0,76 m³. Un metro cúbico tiene una masa de 13 600 kg. Por tanto, la masa de mercurio será

$$m = 0,76 \text{ m}^3 \times 13\,600 \text{ (kg/m}^3\text{)} = 10\,336 \text{ kg.}$$

La fuerza ejercida por esta cantidad de mercurio es

$$F = mg = 10\,336 \text{ kg} \times 9,8 \text{ m/s}^2 = 1,013 \times 10^5 \text{ newtons.}$$

Como la presión se define por el cociente F/A , y $A = 1 \text{ m}^2$, resulta

$$\text{presión atmosférica} = 1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2.$$

Obsérvese que hemos multiplicado por el área de la sección recta para calcular la fuerza y dividimos por esta misma área para calcular la presión por lo que el resultado final es independiente del área.

La altura real de la columna de mercurio en un barómetro no es precisamente 0,76 m; varía de un día a otro y de un lugar a otro distinto, siendo un índice de las condiciones climáticas variables. Por tanto, es suficientemente preciso y más conveniente en la práctica *definir* la presión atmosférica en la superficie terrestre como 10⁵ N/m², y esta magnitud toma el nombre especial de *bar*. Los mapas del tiempo usualmente dan las presiones atmosféricas locales en *milibares* (1 bar = 1 000 milibar)

Otra unidad de presión, frecuentemente utilizada en el trabajo científico, es el *torr*, denominado así en honor a Torricelli. Una presión de un torr corresponde a una lectura barométrica de 1 mm de mercurio. Como la presión atmosférica corresponde a 0,76 m, o sea, 760 mm Hg, el torr es igual a 1/760 atm.

Para mucha gente resulta difícil creer que la atmósfera ejerza, realmente, una presión tan grande. Una experiencia famosa realizada por Otto von Guericke, en Magdeburgo (Alemania), en 1654, contribuyó a dramatizar la magnitud de la presión atmosférica. Dos grandes semiesferas huecas de bronce se ajustaron cuidadosamente por los bordes y se extrajo el aire del interior de la esfera así formada por medio de una bomba de vacío. Un conjunto de ocho caballos se enganchó a cada hemisferio y se les fustigó para que tirasen en direcciones opuestas; la separación de los dos hemisferios se consiguió después de un gran esfuerzo en contra de la presión atmosférica que los presionaba por la superficie externa.

Las propiedades del aire y de la presión atmosférica fueron ampliamente investigadas por Robert Boyle quien conocía las experiencias de Guericke en 1657.

Mediante una bomba de vacío perfeccionada y construida para él por Robert Hooke, Boyle obtuvo un espacio vacío grande en el cual realizó varias experiencias nuevas; por ejemplo, encontró que los animales pequeños quedaban inconscientes y morían al ser privados de aire. En un experimento, Boyle situaba un barómetro de Torricelli dentro de un recipiente cerrado y luego extraía el aire del recipiente. El nivel del mercurio en el tubo descendía a medida que el aire se extraía del recipiente hasta que, finalmente, alcanzaba el mismo nivel que el mercurio de la cubeta. Boyle comprobaba así que era la presión atmosférica exterior la que mantenía el mercurio en el tubo y no el propio vacío el que ejercía succión en la parte superior del tubo.

Poco después que Boyle publicara sus experimentos en 1660, sus conclusiones fueron criticadas por Franciscus Linus, un jesuita científico y profesor de matemáticas y de hebreo en la universidad de Lieja, en Bélgica. Linus aseguraba que el espacio, aparentemente vacío, sobre el mercurio contenía, de hecho, una cuerda invisible o membrana que llamaba *funiculus* (palabra latina que significaba «cuerda pequeña»). Según Linus, cuando el aire se expande o enrarece, el «funiculus» ejerce una fuerza atractiva violenta sobre todos los objetos de los alrededores, y es esta atracción la que tira del mercurio hacia arriba en el tubo. Decía que colocando un dedo sobre el extremo de un tubo y haciendo el vacío en el mismo con una bomba (o con un moderno aspirador de polvo) se podía sentir, realmente, cómo el «funiculus» tiraba de la yema del dedo. ¡Inténtese!

La teoría del «funiculus» parecía una idea fantástica que ningún científico tomaría hoy en serio. Pero este tipo de explicación pseudomecánica era muy popular en los primeros tiempos de la ciencia moderna. Boyle no ignoró simplemente a Linus, teniendo en cuenta, quizás, que la nueva idea de la presión del aire necesitaba una mayor justificación antes de que fuera, generalmente, aceptada. Con su refutación a la hipótesis del «funiculus», Boyle publicó en 1662 algunas medidas cuantitativas de la relación entre presión y volumen de aire, en apoyo de lo que ahora se llama *ley de Boyle* y que trataremos en la sección siguiente. Aunque es la ley de presión-volumen la que dio fama a Boyle, no debemos olvidar que en su tiempo los trabajos que realizó, para establecer la importancia cualitativa de la presión del aire, fueron más significativos.

19.3 Ley general de los gases

La compresibilidad del aire —un hecho comprobado de manera general, desde hace tiempo— fue puesto en forma cuantitativa gracias a los experimentos de Boyle, según los cuales, para una determinada masa de gas encerrada en una vasija a temperatura constante, toda disminución de volumen lleva consigo un incremento



Fig. 19.2 Robert Boyle (1627-1691). Obsérvese al fondo una de sus bombas dispuesta para vaciar un globo de vidrio.

proporcional de presión; al revés, al incrementarse la presión, decrece el volumen.* En la terminología moderna se escribe

$$P \cdot V = \text{constante (a temperatura constante),} \quad (19.2)$$

* La complicada historia del descubrimiento de la ley de Boyle ha sido aclarada, recientemente, por los historiadores. Parece ser que la ley fue propuesta primeramente por otros dos científicos británicos (Henry Power y Richard Towneley) sobre la base de unos experimentos que iniciaron en 1653. No publicaron sus resultados inmediatamente, sino después de que los primeros experimentos de Boyle sobre la presión del aire hubieran sido publicados en 1660. Power envió un artículo describiendo los resultados de su trabajo a su amigo, William Croone, en Londres. El título del artículo era «Experimentos adicionales realizados en Towneley Hall durante los años 1660 y 1661 con la ayuda y el consejo del heroico y valioso caballero Richard Towneley». Pero Power no quiso poner su nombre en el artículo. Croone envió el artículo a Boyle olvidando mencionar que Power era el autor. Boyle fue muy cauteloso antes de dar crédito a la información recibida y, en su monografía de 1662 replicando a Linus, estableció que él no había comprobado que la simple relación $PV = \text{constante}$ fuese aplicable a sus propios datos, hasta que Richard Towneley se lo insinuó. Científicos posteriores, que leyeron los trabajos de Boyle sin mucha atención, supusieron que Boyle había hecho el descubrimiento por sí mismo.

en donde P se refiere a la presión real del gas considerado (por ejemplo en N/m^2) y V es el volumen del gas (por ejemplo en m^3).

Después del trabajo de Boyle se realizó un esfuerzo continuado para descubrir el efecto de los *cambios de temperatura* sobre la presión o el volumen de un gas. En el siglo XVIII, Guillaume Amontons y Jacques Charles sugirieron que si en una muestra de gas se mantiene la presión constante, su volumen crecerá proporcionalmente al incremento de temperatura ($\Delta V \propto \Delta T$ a P constante). Esta ley fue establecida, definitivamente, a partir de experimentos extensos realizados sobre cierto número de gases por el químico francés Joseph Louis Gay-Lussac alrededor de 1800, y confirmada, poco después en Inglaterra por John Dalton. Brevemente, la llamaremos *ley de Gay-Lussac*, en honor al científico francés, que parece ser fue quien más contribuyó en establecer su validez, reconociendo, sin embargo, que lo mismo que en el caso de la ley de Boyle, varios científicos hicieron importantes contribuciones en su proposición y ensayo.

Para entender bien el significado de la ley de Gay-Lussac en un experimento real, imaginemos una masa de gas contenida en un globo de paredes delgadas y fácilmente extensible. La presión interna y externa es siempre la misma e igual, constantemente, a una atmósfera. Si calentamos los alrededores (ΔT), el globo se dilata (ΔV). Lo que más sorprende es el hecho de que el incremento relativo de volumen por grado de elevación de temperatura es, exactamente, el mismo para todos los gases, independientemente de su constitución química. Para apreciar lo inesperado de este resultado, recordemos que, al calentar un sólido o un líquido, se obtiene, ordinariamente, una dilatación lineal o cúbica proporcional al cambio de temperatura, pero con una gran diferencia en el valor relativo de la dilatación para diferentes sólidos o líquidos (alrededor del 0,01 % para el hielo, 0,0025 % para el cuarzo, 0,02 % para el mercurio y para el agua, y 0,15 % para la acetona).

Sin embargo, en condiciones normales, casi todos los gases se dilatan, aproximadamente, $1/273$ (es decir, 0,37 %) de su volumen cuando se calientan de 0°C a 1°C . El mismo cambio de volumen se observa también a temperaturas mucho más bajas, siempre que la presión del gas sea suficientemente baja. (Si un gas se enfría continuamente a presión constante llegará a condensarse en forma líquida y, por tanto, dejará de cumplir la ley de Gay-Lussac.) Así pues, llamaremos *gas ideal* al que obedece perfectamente las leyes de Boyle y Gay-Lussac; el comportamiento de los gases reales se aproxima al de los gases ideales en el límite de bajas presiones.

Supongamos que un gas ideal pudiera enfriarse hasta 273° por debajo del punto de fusión del hielo (es decir, hasta -273°C); entonces, según la ley de Gay-Lussac —si fuera válida para una tan amplia gama de temperaturas—, se contraería $1/273$ de su volumen a 0°C por cada grado de enfriamiento y llegaría a perder todo su volumen. Aunque esta condición no puede comprobarse experimentalmente, sugiere que podemos considerar la temperatura especial -273°C (más precisamente, $-273,15^\circ\text{C}$) como *el cero absoluto de temperaturas* en el sentido de que no pue-

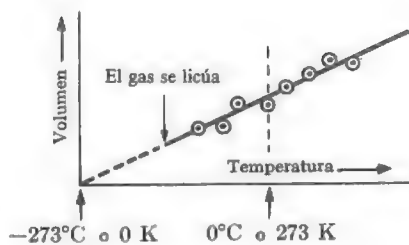


Figura 19.3

den alcanzarse temperaturas inferiores.* En consecuencia, podemos simplificar la ley $\Delta V \propto \Delta T$ (a P constante) escribiendo $V \propto T$ a P constante si la temperatura T se mide en una nueva escala de temperaturas, es decir, la escala absoluta (en grados absolutos, K), en donde $0\text{ K} = -273^\circ\text{C}$. La letra K se eligió en honor de William Thomson, Lord Kelvin, quien propuso por vez primera esta escala en 1848 y demostró su acuerdo con el segundo principio de la termodinámica. (Recordemos que la definición de entropía dada por Clausius en 1865 utiliza esta escala de temperatura; véase sec. 18.4.)

Evidentemente, la relación entre estas dos escalas es:

$$\text{temperatura (en K)} = \text{temperatura (en } ^\circ\text{C)} + 273.$$

Por ejemplo, 0°C es equivalente a 273 K; la temperatura ambiente (20°C) es de 293 K; el agua hierve a 373 K; y un intervalo de un grado en la escala absoluta es igual a un intervalo de un grado en la escala centígrada.

Problema 19.1 La fig. 19.3 es un gráfico hipotético de datos experimentales para una muestra de gas a presión constante; aquí, el volumen V se representa en función de la temperatura T . El gráfico ilustra el cociente $\Delta V/\Delta T = \text{constante}$ (ley de Gay-Lussac). Demostrar, geoméricamente, que si se cumple la ley de Gay-Lussac también $V \propto T$ (a P constante siempre que T se mida en la escala absoluta). Demostrar también que la proporcionalidad $V \propto T$ no es cierta si T se mide en $^\circ\text{C}$.

Sin embargo, lo que más nos interesa es el siguiente paso: la combinación de las dos leyes en una sola. Si para un gas (por la ley de Boyle) $V \propto 1/P$, y por la ley de Gay-Lussac $V \propto T$, entonces, $V \propto T/P$. Esto implica que el cociente PV/T

* De acuerdo con el tercer principio de la termodinámica propuesto por Walther Nernst en 1906, todas las propiedades termodinámicas tienden a cero al aproximarse al cero absoluto de temperaturas y, en consecuencia, éste es inaccesible.

es igual a una constante (usualmente llamada r), cuyo valor depende sólo de la muestra. Así podemos escribir:

$$PV = rT. \quad (19.3)$$

Esta última ecuación, de gran utilidad, se denomina *ley de los gases ideales*; relaciona, de un modo simple, las tres variables de interés en cualquier muestra determinada de gas y es, aproximadamente, válida para todos los gases reales en condiciones ordinarias.

Problema 19.2 Determinar r en la Ec. (19.3) para una muestra de hidrógeno que pesa 2 g y ocupa un volumen de 22,4 l a 0 °C y 1 atmósfera de presión (es decir, 1 bar, según se definió en la sec. 19.2). Determinar después el volumen de esta muestra a la temperatura ambiente (20 °C) y una *presión manométrica* de 100 atmósferas. (*Nota:* La presión manométrica se define como la *presión por encima de la atmosférica*.)

En este punto conviene llamar la atención a una importante temperatura: el *punto triple* del agua, que es la única temperatura a la cual pueden coexistir las tres fases (gas, líquido y sólido). El punto triple del agua se encontró que era $273,16 \pm 0,01$ K. En la X Conferencia General de Pesas y Medidas, en 1954, se decidió establecer una nueva escala absoluta de temperaturas basada en dos puntos fijos: el cero absoluto, y el punto triple del agua que ahora *se define con el valor exacto* $T = 273,16000$ K. La nueva escala concuerda con la antigua para todos los propósitos prácticos, pero tiene la ventaja de que los puntos fijos no son tan arbitrarios. (Como los puntos de fusión y ebullición de una sustancia varían con la presión, se debe especificar una presión particular, a saber: la presión media de la atmósfera en la superficie terrestre. Sin embargo, el punto triple tiene lugar siempre a una presión definida: 4,58 torr.)

19.4 Dos modelos para los gases

Vamos a intentar ahora interpretar estas observaciones y la ley general de los gases que las resumen, a partir de algún modelo o estructura para ellos. La simple observación cualitativa de que todos los gases son muy compresibles y expansibles («la elasticidad del aire») necesitaba alguna explicación especial. El mismo Boyle, en 1660, al tiempo que favoreció un modelo «sin defenderlo perentoriamente», daba, para este fenómeno, dos explicaciones opuestas, ambas en forma de modelos atómicos, pues tanto él como sus contemporáneos comenzaron a aceptar el atomismo como parte de la imagen materialista del mundo que entonces surgía. Expresado

en sus propias palabras, «por todo lo que yo puedo claramente discernir, cualquier cosa que se lleve a cabo en el mundo material se efectúa, realmente, por cuerpos particulares que proceden de acuerdo con las leyes del movimiento».

Las dos explicaciones opuestas que daba, podemos llamarlas modelo *estático* y modelo *cinético*, respectivamente. Si el aire consta de partículas en contacto unas con otras y en reposo, la gran compresibilidad de los gases exige que los mismos corpúsculos constitutivos sean compresibles, como pequeños resortes o —como decía Torricelli— como trozos de lana. En cambio, si los corpúsculos del gas no están siempre en contacto, no necesitan tener dimensiones variables ni formar un conjunto estático, sino que deben estar en violenta agitación, moviéndose a través de todo el espacio disponible y, tal vez, sumergidos en un fluido «sutil» que lo invade todo y en movimiento turbulento. Recordemos que la idea de fluido sutil, propuesta por Descartes para explicar el movimiento de los planetas, había captado la imaginación de toda Europa y parecía explicar, cualitativamente, el comportamiento de los gases bastante bien.*

Habiendo llamado al primero modelo estático de un gas y al segundo modelo cinético, vamos a hacer un breve comentario de cada uno de ellos. Por lo que se refiere al primero, la compresibilidad elástica de partículas estáticas no puede explicar fácilmente una propiedad muy característica de los gases —su capacidad de dilatarse infinitamente en todas direcciones a menos, desde luego, que admitiéramos que cada átomo pueda crecer infinitamente en la dilatación, cosa improbable. Ya que un conjunto de resortes ordinarios se opondría a la compresión, pero no se dispersaría continuamente al cesar ésta. Por tanto, algunos seguidores del punto de vista estático encontraron necesario considerar que los corpúsculos del gas no cambian de tamaño pero pueden repelerse a distancia. Evidentemente, habría que inventar un nuevo agente especial de repulsión, una nueva fuerza entre los átomos del gas, porque la conocida atracción gravitatoria mutua entre cuerpos grandes, que sería el candidato lógico para explicar las fuerzas intercorpúsculares, siempre había resultado ser una fuerza de atracción como es, evidentemente, la naturaleza de las fuerzas que mantienen unidas las partículas en *sólidos* y *líquidos*.

La fuerte autoridad de Newton parece querer ayudar al modelo estático, ya que en los *Principia* había demostrado, mediante una demostración matemática, que *si* una muestra de gas estuviera constituida por partículas mutuamente repulsivas y *si* la fuerza de repulsión entre dos partículas cualesquiera fuese *inversamente proporcional* a la distancia entre sus centros, la presión del gas de esta muestra aumentaría al disminuir un poco el volumen, que es lo que resulta de la ley de Boyle. Newton no pretendía demostrar que los gases, en realidad correspondan a este

* De hecho, Boyle intentó hallar una prueba experimental de la existencia de este fluido sutil, independiente de las partículas sobre las cuales suponía que actuaba, y sus trabajos señalaban el comienzo de una fútil investigación de 250 años para poner de manifiesto de manera directa la existencia del fluido etéreo.

modelo; por el contrario, dice: «que los fluidos elásticos consten realmente de partículas con mutua repulsión entre ellas, es una cuestión física» (es decir, que ha de establecerse por la experiencia). Y, ciertamente, este tipo postulado de fuerzas haría que los gases presentaran comportamientos distintos para diferentes *formas* del recinto, lo cual no corresponde a lo observado. Sin embargo, pertenece a Newton esta primera deducción *cuantitativa* del comportamiento de los gases, a partir de una hipótesis atómica, y sus resultados causaron una fuerte impresión.

El segundo punto de vista, o modelo cinético del gas, se podría haber formulado sin recurrir a un fluido imponderable (si no fuese por la fuerza ineludible y casi hipnótica de esta idea), ya que la opinión de los atomistas griegos, referida por Aristóteles y Lucrecio, era que las partículas, especialmente las que no están unidas de manera concreta, están «siempre deambulando por el gran vacío», de igual manera que las minúsculas partículas de polvo se ven bailar en un rayo de sol que atraviesa un cuarto oscuro.*

En 1738, el físico suizo Daniel Bernoulli publicó un desarrollo cuantitativo profético, de un tipo «lucreciano» de modelo cinético de los gases. Pensaba que los «corpúsculos» del gas eran tan pequeños que su número era «prácticamente infinito» en las condiciones ordinarias, aun para el gas contenido en un recipiente pequeño. En su rápido movimiento en todas direcciones, estos corpúsculos chocan unos con otros, y también con las paredes de la vasija. Bernoulli consideraba que estas colisiones eran perfectamente elásticas; por tanto, según se acepta, la energía cinética de las mismas se conserva y su movimiento puede continuar sin disminuir. La presión que se espera que un gas ejerza sobre las paredes de la vasija se debe, pues, al incesante choque de millones de partículas rápidas; de aquí, el nombre de *teoría de los impactos para la presión del gas*.

Supongamos ahora un gas encerrado en un cilindro con un pistón (fig. 19.4) y que lo desplazamos ligeramente hacia abajo. Los corpúsculos se irán concentrando más y más, conforme disminuya el volumen ocupado por el gas, y el número de colisiones por segundo, contra las paredes, aumentará del modo correspondiente. Por tanto, la presión será mayor, como realmente se observa. También calculó Bernoulli la magnitud de este aumento esperado y vio que correspondía a la ley experimental de Boyle. Entonces decía:

«La elasticidad del aire (la presión que ejerce sobre las paredes de la vasija) no solamente crece por la condensación (disminución de volumen), sino por el calor que se le comunica; y como se admite que el calor puede considerarse como un aumento del movimiento interno de las partículas, resulta que si la elasticidad del

* Si se hubiese objetado que tal movimiento incesante de los corpúsculos es imposible, podría haberse señalado que la turbulencia eterna del éter, como en los torbellinos de Descartes, eran igualmente objetables.

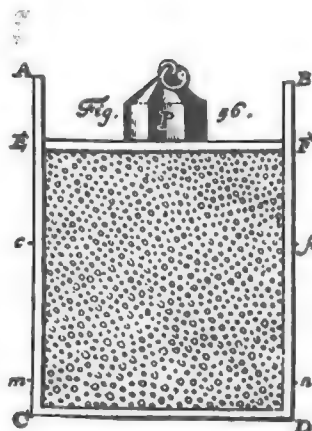


Fig. 19.4 La presión ejercida sobre el pistón por el peso P viene equilibrada por el impacto de las partículas gaseosas rápidas. (De la *Hidrodinámica* de Daniel Bernoulli, 1738.)

aire, cuyo volumen no cambia, aumenta (calentando el aire), esto indica un movimiento más intenso de las partículas del mismo; lo cual se ajusta, perfectamente, con nuestras hipótesis...”

Finalmente, el reconocimiento de que la expresión PV/T es constante para una muestra de gas está implícito, en forma general, en el resumen final.

Este modelo, este modo de razonar y este resultado son en todo semejantes al trabajo que más de un siglo después aclararía, simultáneamente, los problemas principales de la naturaleza de los gases, del calor y de la química. Sin embargo, en aquel tiempo, el trabajo de Bernoulli era, generalmente, ignorado. Esta falta de atención durante tanto tiempo es, en efecto, notable y no se explica por el hecho de que los gases no eran claramente entendidos por los químicos o por la falta de medidas de densidad necesarias para conocer los valores numéricos de la velocidad media de las partículas.

El otro modelo o teoría de Boyle-Newton, basado en las fuerzas repulsivas entre partículas gaseosas, resultó ser más adecuado para los científicos del siglo XVIII, quienes adoptaron la teoría del calórico (sec. 17.7). La fuerza repulsiva era atribuida a la atmósfera de fluido calórico que rodeaba cada átomo. Calentar un gas significaba derramar en él más calórico, expandir la atmósfera y, por tanto, intensificar la fuerza repulsiva. Aunque la teoría del calórico no excluía completamente la noción de que el calor podía asociarse al movimiento de las partículas, resultaba incompatible con la hipótesis de Bernoulli de que el calor *no es más que* el movimiento de las partículas. El descubrimiento, por Joseph Black, del calor latente parecía indicar que una simple proporcionalidad entre calor y temperatura no podía ser, generalmente válida, ya que una cantidad finita de calor debe añadirse a un

líquido para transformarle en gas sin variación de temperatura; éste fue uno de los diversos fenómenos que se consideraron más fácilmente explicables por la teoría del calórico que por la teoría cinética. De nuevo, la teoría de Bernoulli al postular el movimiento libre de los átomos a través del espacio vacío ignoraba el éter, que se consideraba llenaba todo el espacio; mientras que el calórico podía, fácilmente, identificarse como una clase especial de éter. Una teoría cinética modificada, como la propuesta en 1727 por otro científico suizo, el famoso matemático Leonhard Euler, hubiera sido un mejor compromiso, pues explicaba algunos de los resultados de Bernoulli sobre la base de un modelo de partículas atómicas *girando* en un fluido etéreo. Sin embargo, la teoría de Euler no atrajo mayor atención que la de Bernoulli en el siglo XVIII y era mucho menos semejante a la teoría finalmente establecida en el siglo XIX.

Quizás podríamos comparar la obra de Bernoulli al avance rápido, aislado y prematuro de un pelotón de soldados que colocan al frente cerca de las líneas enemigas y cuyo valor estratégico no tiene consecuencias, hasta que el cuerpo de ejército total se reúne con esta avanzadilla casi olvidada. Pues Bernoulli, en efecto, había efectuado en su pensamiento dos enormes saltos, para los cuales la gran masa de científicos no estaba preparada: en primer lugar, la equivalencia directa del calor y el movimiento molecular interno, *prescindiendo* de toda interacción con el éter; y en segundo lugar, la idea de que una relación numérica, bien definida, como la ley simple de Boyle, podía deducirse de la imagen caótica de las partículas moviéndose al azar. Debemos aplazar nuestro relato de la victoria final de estas ideas hasta un capítulo posterior, volviendo ahora al examen de otras ideas sobre las propiedades atómicas que se desarrollaron mientras tanto.

Textos recomendados para lecturas posteriores

Robert Boyle, «The spring of the air», y extractos de los escritos de Newton y Bernoulli reimpresos por S. G. Brush, en *Kinetic Theory*, vol. 1.

J. B. Conant, «Robert Boyle's experiments in pneumatics», págs. 1-63 en *Harvard Case Histories in Experimental Science* (editado por J. B. Conant), Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1948. También existe como separata.

Marie Boas Hall, «Robert Boyle», *Scientific American*, agosto de 1967, páginas 97-102.

E. C. Kemble, *Physical Science*, capítulo 12.

Fuentes, interpretaciones y trabajos de referencia

I. B. Cohen, «Newton, Hooke, and “Boyle’s Law” (Discovered by Power and Towneley)», (Newton, Hooke y la ley de Boyle descubierta por Power y Towneley), *Nature*, vol. 204, pág. 618 (1964).

R. Dugas, *Mechanics in the Seventeenth Century*, capítulo VIII.

M. B. Hall, *Nature and Nature’s Laws*, págs. 184-215. Extractos de los escritos de Torricelli, Pecquet y Boyle.

W. S. James, «The discovery of the gas laws», *Science Progress*, vol. 23, páginas 261-279 (1928), y vol. 24, págs. 57-71 (1929).

L. T. More, *The Life and Works of the Honourable Robert Boyle*, London y New York: Oxford University Press, 1944.

C. Truesdell, «Early kinetic theories of gases», págs. 272-304, en sus *Essays in the History of Mechanics*, New York: Springer-Verlag, 1968.

C. Webster, «The discovery of Boyle’s law, and the concept of the elasticity of air in the seventeenth century», *Archive for History of Exact Sciences*, vol. 2, páginas 441-502 (1965).

Capítulo 20

La teoría atómica de la química

20.1 Elementos químicos y átomos

Cuando en los capítulos anteriores utilizamos las palabras *átomo*, *corpúsculo*, *partícula* y otras semejantes, no se pretendía indicar que los escritores antiguos o los científicos, incluso de los siglos XVII y XVIII, tuvieran en la mente lo que ahora entendemos por átomo. La idea general de una partícula «más pequeña» era un componente común de diversos esquemas conceptuales de la física y la química, usualmente modelos mecánicos que postulaban pequeños cuerpos indivisibles, que permitían explicar ciertas propiedades de la materia. Sin embargo, aunque los teóricos podían asignar ciertas propiedades como forma o elasticidad a sus átomos, estas propiedades no eran susceptibles de medidas u observaciones directas y podían diferir ampliamente de una teoría a la siguiente.

Como hemos visto, las hipótesis atomísticas hasta el siglo XIX no habían dado lugar a una teoría precisa y concreta de la materia o del calor. Sin embargo, entre la publicación del libro de Boyle, *Sceptical Chymist*, en 1661, y la muerte de Lavoisier en 1794, se desarrolló un concepto básico que había de jugar un papel esencial en el establecimiento con precisión de la hipótesis atomística. Éste fue el concepto de *elemento químico*. Boyle había intentado destruir la antigua imagen deducida de los partidarios de Aristóteles y de los seguidores del químico del siglo XVI, Paracelso, según la cual los elementos eran, esencialmente, distintos tipos de materia, y ésta se encuentra siempre en forma de mezcla, nunca pura. Boyle propuso, en su lugar, que la química debe construirse sobre una identificación y el conocimiento de aquellas sustancias químicas que se encuentran en la Naturaleza y que no pueden separarse en componentes distintos por métodos conocidos. Al final del siglo XVIII, los químicos aceptaron esta definición operacional de *elemento*: sustancia que no puede descomponerse en otras por métodos físicos o químicos disponibles en el momento presente. La posibilidad de que estos elementos resultaran ser en el futuro compuestos de sustancias todavía más básicas era una cuestión que se dejaba libremente a los metafísicos o a los futuros científicos.

El mismo Lavoisier, en el prefacio a sus *Elementos de química* (1789), había escrito este relevante, y por otra parte totalmente moderno, análisis del concepto de «elemento» y de su relación con las hipótesis atomísticas de sus predecesores:

«Todo lo que puede decirse sobre el número y naturaleza de los elementos está, en mi opinión, confinado a discusiones de naturaleza metafísica. El tema sólo nos suministra problemas indefinidos que pueden resolverse en miles de formas distintas, ninguna de las cuales, con toda probabilidad, es consistente con la Naturaleza. Yo sólo añadiré a esta cuestión que si por el término *elemento* nos referimos a aquellos átomos simples e indivisibles de los cuales se compone la materia, es muy probable que no sepamos nada acerca de ellos; pero si aplicamos el término *elemento o principio de los cuerpos* para expresar la idea del último término que el análisis (químico) puede alcanzar, debemos admitir como elementos todas las sustancias en las cuales, por cualquier medio, podamos descomponer los cuerpos. Nada nos autoriza a afirmar que estas sustancias han de considerarse tan simples que no puedan estar compuestas de dos o incluso de un mayor número de principios; pero dado que estos principios no pueden ser separados (unos de otros), o hasta ahora no hemos descubierto el medio de separarlos, se comportan, para nosotros, como sustancias simples, y nunca deberíamos suponerlas compuestas hasta que el experimento y la observación nos lo haya demostrado.»

Algunas sustancias conocidas desde la antigüedad (como los metales más comunes y el azufre) fueron considerados ahora como elementos, y se llegaron a identificar hasta una tercera parte de los elementos conocidos hoy en día. Por supuesto, que la lista de «elementos» incluía también muchos compuestos recalcitrantes que permanecían como tales hasta que la electrólisis y otros medios poderosos pudieron separarlos en sus componentes. En aquel tiempo, el «calórico» (la sustancia calor) se consideraba también como uno de los elementos químicos.

El establecimiento de una relación entre los dos conceptos: *elemento químico* y *átomo*, visto retrospectivamente, resulta ahora quizás demasiado obvio. Los átomos de un elemento químico serían las partículas más pequeñas que pueden participar en la identificación de las reacciones químicas o ensayos de tipo físico. El sentido común nos obliga a postular, mientras no se demuestre lo contrario, que todos los átomos de un elemento son idénticos entre sí. («como artículos manufacturados», según frase de los científicos de la industrializada Inglaterra del siglo XIX) si bien debemos estar preparados para admitir que elementos distintos posean físicamente átomos totalmente distintos (como ciertamente es el caso). También es razonable esperar que un elemento en estado gaseoso, por ejemplo oxígeno o hidrógeno, conste de átomos individuales y que un compuesto químico, por ejemplo, vapor de agua, puede imaginarse constituido por partículas que cada una de ellas contenga dos o más átomos de elementos distintos. En particular, simplificando al máximo las hipótesis, los corpúsculos más pequeños de vapor de agua (en principio podría-

mos llamarlos *átomos* de agua) podrían considerarse formados por la unión íntima de átomos de hidrógeno y oxígeno, los dos gases que, mezclados con explosión, producen agua.

Estas consideraciones describen, en esencia, los pensamientos del inglés John Dalton (1766-1844), quien desde 1800 trabajó con eficacia para conseguir la unión entre el concepto de elemento químico y las hipótesis atómicas antiguas. Dalton era un auténtico autodidacta. Persona retirada, hijo de un humilde tejedor manual, tuvo que mantenerse pobremente como maestro (casi desde sus 12 años) y preceptor general en Manchester. Dalton poseía una fuerte iniciativa y rica imaginación, particularmente para los modelos mecánicos e imágenes mentales, pero lo más notable era su extraordinaria intuición física que le llevó a importantes conclusiones, a pesar de ser solamente «un experimentador tosco», como le llamó su contemporáneo Humphry Davy* (sección 17.7).

20.2 Modelo de Dalton para los gases

Como Kepler y Newton, a quienes se semejaba en muchos aspectos, Dalton trabajó sobre gran variedad de temas; pero el principal trabajo de Dalton surgió de su interés por la estructura *física* de los gases. Decía que, debido a su interés por la meteorología, se admiraba de cómo la atmósfera terrestre, siendo una mezcla de gases de densidades muy diferentes (principalmente nitrógeno, oxígeno y vapor de agua), presentaba, sin embargo, una homogeneidad tan grande. Encontró que las muestras de aire, tomadas a diversas alturas, tenían la misma proporción de estos componentes, cuando podía esperarse que el nitrógeno, por ser menos denso que el oxígeno, se mantendría «flotando» sobre este último, como ocurre con el aceite sobre el agua. (Afortunadamente, quizás, para el avance de la teoría atómica, no era entonces posible tomar muestras de aire en regiones superiores a varios kilómetros sobre la superficie de la Tierra; *existe* una diferencia notable de composición a alturas superiores.)

Rumford habría dado una solución a este problema, pues al discutir el caso análogo de mezclas de líquidos distintos, decía que las partículas individuales «por su movimiento peculiar y continuo» (agitación térmica) pueden difundirse unas en otras, dando lugar a una mezcla homogénea. Dalton no podía admitir tal solución, pues había adoptado el modelo estático para los gases y no el cinético (erróneamente), convencido de que el gran Newton había *probado* la validez de la teoría estática en el breve pasaje de sus *Principia* al que nos hemos referido en la sección

* Para un relato del trabajo de Dalton, que ha sido una de las principales fuentes para la preparación de este capítulo, véase Leonard K. Nash, «The atomic molecular theory», caso 4, en *Harvard Case Histories in Experimental Science*, (editado por J. B. Conant); Cambridge: Harvard University Press (1950) reedición 1957.

19.4. Dalton escribió en una ocasión: «Newton ha demostrado a partir de los fenómenos de condensación y enrarecimiento que los fluidos elásticos están constituidos por partículas que se repelen entre sí por fuerzas que crecen a medida que la distancia entre sus centros disminuye; en otras palabras, las fuerzas están en razón inversa con las distancias. Esta deducción será válida en tanto las leyes de los fluidos elásticos persistan en su forma actual.»

Dalton se vio obligado de manera natural a rechazar el punto de vista cinético del calor, junto con el punto de vista cinético de los gases y a adoptar la teoría del calórico que constituía entonces aún el esquema conceptual general para los fenómenos caloríficos. La única solución satisfactoria al problema de la homogeneidad de las mezclas gaseosas basada en un modelo estático era, para Dalton, el siguiente conjunto de hipótesis y deducciones, algunas de ellas tomadas de la labor de sus predecesores:

a) *Cada partícula de gas está rodeada por una atmósfera de calórico.* Como Dalton decía en su obra principal, «una vasija llena de un fluido elástico puro, puede imaginarse como si estuviera llena de perdigones. Los glóbulos son todos de las mismas dimensiones; pero las partículas de fluido difieren de las de los perdigones en que están constituidas de un átomo central, muy pequeño, de materia sólida, rodeado por una atmósfera de calor de mayor densidad cerca del átomo y que va disminuyendo según cierta potencia de la distancia». (*A New System of Chemical Philosophy.*)

b) *Las partículas están esencialmente en reposo y sus capas de calórico en contacto.* En la parte superior de la fig. 20.1, tomada del libro de notas de Dalton, se observa el caso de dos átomos de gas próximos. Para Dalton, el único modo de que un cuerpo ejerciera una fuerza sobre otro era estando en contacto directo; la noción de acción a distancia le era tan poco convincente como para la mayoría de los contemporáneos de Newton.

c) *El diámetro total de cada partícula, teniendo en cuenta la capa o atmósfera de calórico, difiere de una sustancia a otra.*

«...lo siguiente puede adoptarse como un postulado, a menos que aparezca alguna razón en sentido contrario; a saber: cada especie de fluido elástico puro tiene sus partículas globulares del mismo tamaño; dos especies no concuerdan en el tamaño de sus partículas a igual presión y temperatura.»

Este punto resultó ser crucialmente importante en desarrollos posteriores. Dalton pensaba haber deducido este postulado sin ambigüedades a partir de evidencias experimentales del siguiente tipo: Uno de los productos formados cuando el oxígeno y el nitrógeno se combinan es el óxido nítrico, o como Dalton decía, «el gas

nitroso». Sobre otras bases, Dalton había decidido que en este gas un átomo de nitrógeno se combina siempre con un átomo de oxígeno. Sin embargo, en sus propios experimentos parecía que la *razón de volúmenes* de gas oxígeno a gas nitrógeno, necesaria para la reacción, no era 1 : 1 (que indicaría volúmenes iguales para ambos tipos de átomos), sino más aproximadamente 0,8 : 1, indicando que los átomos de nitrógeno eran algo mayores que los átomos de oxígeno. (En realidad, los resultados experimentales son confusos, ya que, simultáneamente, pueden producirse diferentes compuestos de nitrógeno y oxígeno.)

La misma serie de experimentos parecía dar a Dalton otra confirmación de su «postulado». El gas nitroso así formado poseía doble volumen que cualquiera de los elementos componentes. En términos de un gas cuyas partículas se tocan, esto parecía indicar claramente que las partículas o átomos (compuestos) del gas nitroso poseían un volumen doble al de las partículas de oxígeno o nitrógeno.

Los experimentos realizados sobre vapor de agua parecen soportar el mismo tipo de conclusión: «Cuando se mezclan dos porciones de hidrógeno y una de oxígeno y se queman con una chispa eléctrica, el conjunto se convierte en vapor y, si la presión es grande, este vapor pasa a ser agua. Lo más probable es que exista el mismo número de partículas en dos porciones de hidrógeno que en una de oxígeno...», es decir, los átomos de hidrógeno son dos veces mayores que los de oxígeno.

d) Volviendo al problema inicial Dalton, basándose en especulaciones cualitativas, sacaba la conclusión de que no podía haber estratificación del aire en sus distintos elementos *porque las partículas contiguas de diversos tamaños tenderían a repelerse* hasta que se alcanzara la estabilidad en una mezcla homogénea.

e) Por tanto —razonaba—, los constituyentes de la atmósfera deben mezclarse entre sí en el desequilibrio durante su encuentro original y, a partir de entonces, permanecen homogéneos.

Esta imagen sugestiva de la atmósfera impulsó a Dalton a considerar a continuación el número de átomos y sus pesos relativos, particularmente «de todos los principios químicos elementales que entran en cualquier tipo de combinación». Pero antes de considerar los resultados enormemente fructíferos que se reportaron de esta decisión, pasaremos revista al hecho sorprendente de que cada uno de los puntos a) a e) anteriores está *equivocado* desde el punto de vista actual e, incluso, en función de su consistencia interna; además de la propia premisa, la prueba supuesta de Newton del modelo estático, está la falsa interpretación de Dalton.

Existe una sutil ilustración de la posición que hemos considerado en la parte D, a saber: que la ciencia no ha de considerarse como un resultado inevitablemente fructífero que se obtiene al seguir paso a paso un método claro. Por otra parte, tampoco puede concluirse que la ciencia avanza «dando palos de ciego», de error en error, realizando descubrimientos sólo por casualidad o por suerte, ni tampoco que

sea un conjunto de subproductos de una cantidad prodigiosa de trabajos en gran manera infructuosos realizados en múltiples lugares y a lo largo de los siglos.

Problema 20.1 Considerando incuestionable la influencia estimulante de la teoría atómica general de Dalton sobre la química (los detalles se exponen en las páginas siguientes), escribir un breve análisis del proceso creador de Dalton en relación con el aspecto dual de las ciencias S_1 y S_2 (secciones 13.1 a 13.7).

20.3 Propiedades del átomo químico de Dalton

Volvamos al crecimiento de la teoría atómica de la química. El tratado de Dalton, *Nuevo sistema de filosofía química*, se publicó en dos partes, en 1808 y en 1810. Extractaremos de esta obra y de algunos de sus escritos los principales principios que reflejan las ideas fundamentales de su esquema conceptual.

a) *La materia consta de átomos indivisibles.*

«La materia, aunque divisible en un grado *extremo*, no es, sin embargo, *infinitamente* divisible. Esto es, debe haber un punto, más allá del cual no podemos ir en la división de la materia. La existencia de estas últimas partículas de la materia no puede apenas ponerse en duda, aunque probablemente sean tan sumamente pequeñas que no puedan apreciarse ni aun con dispositivos microscópicos. Yo he elegido la palabra *átomo* para representar estas últimas partículas...»

b) *Los átomos son invariables.* Los átomos de los diferentes elementos «nunca pueden transformarse los unos en los otros por ninguna potencia que podamos controlar», tal como el fallo de la alquimia había manifestado claramente. Ensayos continuos habían demostrado que la transmutación de elementos era imposible —*un postulado de impotencia* obtenido de un modo semejante a la deducción de la ley de conservación de la energía a partir del fracaso de la obtención del móvil perpetuo.

c) *Los compuestos están formados por moléculas.* Los compuestos químicos están formados por la combinación de átomos de dos o más elementos en «átomos compuestos», o *moléculas* que es como ahora llamamos a las partículas más pequeñas de un compuesto.

«A la última partícula de ácido carbónico le llamaré *átomo compuesto*. Ahora bien, aunque este átomo pueda dividirse, cesará entonces de ser ácido carbónico, resolviéndose, por división, en carbón y oxígeno. Por ello, considero que no hay

«debería suponerse que cada partícula de hidrógeno se adhiere a una partícula de oxígeno y las dos partículas así unidas forman *una*, de la cual emana la energía repulsiva (por una redistribución del calórico combinado); así, el nuevo fluido elástico puede perfectamente obedecer la ley de Newton...».

d) *Todos los átomos o moléculas de una sustancia pura son idénticos.*

«Las últimas partículas de todos los cuerpos homogéneos son perfectamente semejantes en peso, figura, etc. En otras palabras, todas las partículas de hidrógeno son iguales entre sí...»

Aquí Dalton simplificaba más que los primitivos atomistas, que consideraban átomos de diferentes dimensiones, en un mismo elemento, del mismo modo que dos guijarros de la misma materia pueden tener diferentes dimensiones y forma.

e) *En las reacciones químicas, los átomos ni se crean ni se destruyen, solamente cambia su distribución.*

«El análisis químico y la síntesis no pueden ir más allá de la separación de las partículas unas de otras, ni de su reunión. Ninguna nueva creación o destrucción de la materia está dentro del alcance de los agentes químicos. Podríamos intentar introducir un nuevo planeta en el sistema solar o aniquilar uno ya existente, lo mismo que crear o destruir una partícula de hidrógeno. Todos los cambios que podemos producir consisten en la separación de partículas que están en estado de cohesión o combinación y en la unión de aquellas que previamente estaban distanciadas.»

Aquí encontramos, por fin, una imagen física sorprendentemente simple para explicar la ley de conservación de la masa que Lavoisier había postulado y demostrado experimentalmente años atrás.

20.4 Símbolos de Dalton para la representación de los átomos

Hemos descrito un pasaje en el cual se representa, gráficamente, la combinación de hidrógeno y oxígeno dando vapor de agua. Para éste y otros casos inventó Dalton representaciones gráficas simples pero ingeniosas, como muestra la figura 20.2. Los alquimistas habían representado las distintas sustancias por diferentes símbolos, pero en las gráficas de Dalton se representaban los *átomos individuales*. Sin embargo, obsérvese que en la fig. 20.2 algunos de los primeros veinte símbolos no representan los átomos de los elementos, sino moléculas de los compuestos, tal como Dalton las entendía. Por ejemplo, los símbolos 9 y 10 que corresponden a la

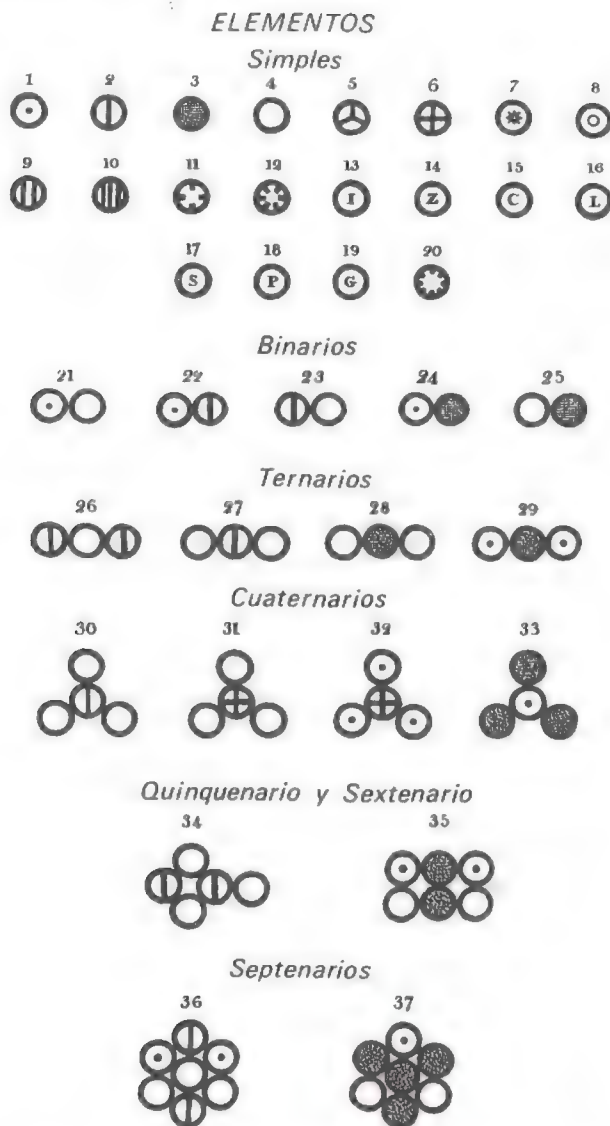


Fig. 20.2 Símbolos de Dalton para átomos elementales y compuestos tomados de su trabajo *A New System of Chemical Philosophy, Parte I*. Dalton escribe: «Esta lámina contiene las marcas arbitrarias o signos elegidos para representar los diversos elementos químicos o últimas partículas». Los nombres modernos para los primeros átomos son: 1, hidrógeno; 2, nitrógeno; 3, carbono; 4, oxígeno; 5, fósforo; 6, azufre.

sosa y a la potasa eran conocidos por Dalton a través de un trabajo de Davy del mismo año (1808) como «óxidos metálicos» (realmente hidróxidos metálicos).

Como haremos cierto uso de estos símbolos históricos, destacaremos los correspondientes a los compuestos. Por ejemplo, el 21 representa una molécula de agua que Dalton consideraba era un compuesto *binario* constituido por un átomo de hidrógeno y uno de oxígeno; el número 22 representa una molécula de amoníaco, cuyos átomos constituyentes son: «uno de azoe (nombre dado entonces al nitrógeno) y uno de hidrógeno»; el 23 representa un átomo de gas nitroso (ahora llamado óxido nítrico), compuesto de un átomo de azoe y otro de oxígeno; el 24 era el símbolo de Dalton para lo que ahora llamamos metano; y el 25 el monóxido de carbono, entonces llamado «óxido carbónico». Entre los compuestos *ternarios* (que tienen tres átomos por molécula), figura el 26, óxido nitroso, aún llamado así, aunque es más familiar el nombre de «gas hilarante»; el 27 es un átomo compuesto de «ácido nítrico», más tarde denominado molécula de dióxido de nitrógeno; el 28 es el «ácido carbónico», llamado ahora dióxido de carbono. De la misma manera, Dalton representaba otros compuestos que sabía contenían más de tres átomos elementales, los cuaternarios, quinquenarios, etc.

En la actualidad, utilizaremos otros símbolos que son los que introdujo en 1819 el químico sueco Berzelius. Para representar la sustancia se utilizan letras. Hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, carbono y cloro se representan, respectivamente, por H, O, N, C, y Cl (la lista completa de todos los elementos puede verse en el Apéndice III) y los compuestos se representan uniendo los símbolos respectivos de los elementos. Por ejemplo, el ácido clorhídrico se representa por HCl y el dióxido de carbono por CO₂. Una reacción química, por ejemplo la combustión de carbono (formación de dióxido de carbono), podría darse de una de las maneras siguientes, la primera es la de Dalton y la última corresponde al convenio actual:



o



o



20.5 La ley de las proporciones definidas

La acumulación de datos analíticos, cada vez más exactos, durante la media centuria anterior, y particularmente la vigorosa disputa entre los químicos franceses Proust y Berthollet, habían fortalecido lo que ahora llamamos la «*ley de las proporciones definidas*» de los pesos que se combinan: Independientemente de la

localidad en que se encuentra una determinada sustancia pura —por ejemplo, un óxido metálico, una gota de líquido o un gas complejo— o independientemente también de que se prepare artificialmente o proceda de una fuente natural, las proporciones en peso de los elementos constituyentes en cada caso son siempre las mismas. Para el agua esta razón de los pesos entre el hidrógeno y el oxígeno es 1 : 8 (valor moderno aproximado; para Dalton fue primero 1 : 6 y, luego, 1 : 7)*.

Combinando la simple imagen gráfica de los átomos y la ley de las proporciones definidas de los pesos de los elementos en combinación, Dalton se vio obligado a aceptar la hipótesis de que en una reacción química existe siempre una proporción fija o definida entre los *números* de los átomos que se combinan. Utilizando una analogía rudimentaria, si al pesar una cantidad de guisantes encontrásemos que este peso es una *fracción constante* del de las vainas vacías, independientemente del número de vainas incluidas o de donde fue recogida la cosecha, podríamos deducir rápidamente que el número de guisantes es el mismo en cada vaina, aunque no conociéramos cuál es este número. De un modo simple, la hipótesis de Dalton dice que *al formarse las moléculas durante las reacciones químicas, los números de átomos que se combinan de los diferentes elementos lo hacen según razones simples y definidas*.

Esta parte de la teoría atómica de Dalton negaba una opinión, entonces extendida y distinguida, sobre las reacciones químicas, según la cual, en el caso particular de dos gases el compuesto está formado por una solución del uno en el otro, de igual modo que el agua y la sal forman el agua salada. Dalton, un poco quejoso, ofrecía varios argumentos para mostrar «lo absurdo de esta doctrina...». En lugar de considerar el agua como una combinación variable o indefinida de partículas de hidrógeno y oxígeno, Dalton concebía toda molécula de vapor de agua formada del mismo modo, o sea, por un átomo de cada elemento. Pero ahí estaba la dificultad; con los conocimientos desarrollados hasta entonces Dalton no podía conocer *cuántos* átomos de cada elemento se combinaban en una molécula de agua; la razón no podía ser 1 : 1, pero quizás, era 2 : 1 o 23 : 61. Los volúmenes relativos de los gases que se combinaban no ofrecían una pista, pues Dalton había ya supuesto que los átomos tenían diferentes tamaños, y éstos eran desconocidos. Todo lo que podía decirse era lo siguiente: los pesos relativos con que se combinan el hi-

* Debemos detenernos un momento para darnos cuenta de que, lo mismo que la ley de conservación de la masa, que fue el fruto de una lucha fiera entre Lavoisier y sus seguidores en contra del flogisto, así se estableció esta ley mucho más rápidamente con el vigor de la disputa entre antagonistas capacitados. También se establecieron otros resultados valiosos como, por ejemplo, una distinción más clara entre compuestos y mezclas y una gran cantidad de datos que proporcionaron materia prima para teorías posteriores. Desde nuestro punto de vista dinámico de la Ciencia, podemos entender mejor esta ilustración del mecanismo de la evolución en la lucha de ideas.

De nuevo (afortunadamente para el desarrollo de la teoría atómica), el peso de la evidencia experimental en 1800 fue en favor de la teoría de Proust de las proporciones definidas; sólo mucho más tarde se estableció que existen algunos compuestos con composición variable.

drógeno y el oxígeno son 1 : 8 y, *suponiendo* que la combinación resulta de unir un átomo simple de cada elemento *por cada molécula*, llegamos a la conclusión de que los pesos atómicos relativos del hidrógeno y el oxígeno son, también, 1 : 8. Por otra parte, si se supone que la fórmula molecular no es HO, sino H₂O (es decir, $H + H + O \longrightarrow H_2O$ o $H_2 + O \longrightarrow H_2O$), entonces los pesos atómicos relativos serían 1 : 16, e igualmente para otras fórmulas. El eslabón que falta, por tanto, para una comprensión de las reacciones químicas es el conocimiento de algunas fórmulas moleculares sencillas.

20.6 Regla de la simplicidad de Dalton

Para salvar esta dificultad, Dalton añadía a su esquema conceptual un nuevo *postulado* que presenta tantas ventajas como peligros, cosa típica de toda hipótesis. Puede llamársele *regla de la mayor simplicidad* de los compuestos estables más comunes.

«Cuando solamente puede obtenerse una combinación de dos cuerpos (elementos), debe suponerse que es binaria, a no ser que aparezca alguna causa que diga lo contrario... Cuando se observan dos combinaciones, debe presumirse que son una binaria y otra ternaria...» y así sucesivamente para más de dos combinaciones. Concretamente, el *agua*, que era entonces la única combinación conocida de oxígeno e hidrógeno, debía ser un compuesto binario (HO o $\odot O$).^{*} De igual manera, las dos únicas combinaciones de carbono y oxígeno que se conocían se identificaron de la manera siguiente: el más ligero de los gases (*óxido carbónico*) por CO, el más pesado (*ácido carbónico*) por CO₂. El compuesto más común de nitrógeno e hidrógeno, el amoníaco, se representaba por NH (hoy sabemos que es NH₃). El etileno y el metano se identificaban por CH y CH₂ (mientras que hoy escribimos C₂H₄ y CH₄).

Un breve examen de cualquier tabla moderna de fórmulas químicas nos vencerá al instante de la falsedad de esta regla. Por ejemplo, el único compuesto de hierro y yodo, el yoduro de hierro, no es binario sino que tiene la fórmula FeI₂. El cloruro de hierro más simple no es FeCl, sino FeCl₂. Los fosfuros de hierro no son FeP, FeP₂ y Fe₂P, como Dalton podía esperar, sino FeP, Fe₂P y Fe₃P. Los óxidos de hierro comunes sabemos que son FeO, Fe₂O₃ y Fe₃O₄. Sin embargo, en la mayoría de casos los datos analíticos (podríamos decir que afortunadamente) eran demasiado ambiguos para indicar un fallo a gran escala de su axioma y en algunos otros daba resultados correctos (p. ej., en los casos de los óxidos de carbono y de nitrógeno). Por encima de todo, la devoción de Dalton a la entonces venerada idea de «la regularidad y simplicidad» de las leyes de la Naturaleza hizo posible una par-

^{*} El peróxido de hidrógeno (H₂O₂) no había sido todavía identificado.

tida, que fue fructífera, hacia la identificación de fórmulas moleculares. Cuando alguna conjetura de una fórmula molecular resultaba errónea, se podía corregir mediante comprobaciones de la consistencia interna; recordemos de nuevo la admonición de que la verdad puede surgir del error más fácilmente que de la confusión.

20.7 Los primeros éxitos de la teoría de Dalton

Podríamos discutir una variedad de sutiles consecuencias del trabajo de Dalton: que sus ideas y conceptos gráficos produjeron un sentimiento más profundo de la realidad de los procesos atómicos en su tiempo; que su identificación de los átomos químicos ayudó a diferenciar, finalmente, entre los conceptos de compuestos químicos puros y mezclas; y otros detalles de este tipo. Pero sobre todo, debemos resumir, brevemente, los logros principales iniciales de la teoría de Dalton: su fuerza en la recopilación de leyes y hechos conocidos proporcionando un esquema conceptual manejable y simple, su éxito en sugerir nuevas relaciones y estimular la investigación; y su poderosa ayuda en la solución de problemas de la ciencia contemporánea. En los siguientes ejemplos pueden encontrarse elementos de cada una de estas funciones:

a) Como vimos, el átomo químico de Dalton es el concepto que aporta un significado físico a la ley de conservación de la masa y la integra en la ley de las proporciones definidas. La última, aunque establecida esencialmente en su época gracias a ensayos empíricos y exhaustivos, no se había aún apreciado de un modo general y explícito. Aquellos resultados experimentales adquirían significado físico y resultaban apoyados por la plausibilidad inherente de la imagen de Dalton; en este sentido podemos decir que Dalton hizo por la discutida ley de las proporciones definidas lo mismo que Newton con las leyes establecidas por Kepler para el movimiento planetario. Otros resultados químicos ya establecidos podían acomodarse de modo semejante (por ej., la ley de las proporciones equivalentes).

b) Quizás el mejor apoyo de la teoría atómica (por un general acuerdo en su época) fue la consecuencia importantísima que surgió de un modo directo y natural del esquema conceptual de Dalton: *Cuando una sustancia se une con otra para formar más de un compuesto, dando lugar así a distintas proporciones* (por ejemplo, 2 : 1 y 3 : 2), *estas proporciones diferentes guardan entre sí razones muy simples* (por ejemplo,

$$\frac{2 : 1}{3 : 2} = 4 : 3).$$

Esta es la *ley de las proporciones múltiples*. Resulta necesariamente de los postulados de la teoría de Dalton, como puede verse fácilmente. Por ejemplo, si representamos el *óxido carbónico* (CO) y el *ácido carbónico* (CO₂) en la notación de Dalton,



es evidente que para la misma cantidad de carbono existe asociada doble cantidad de oxígeno en el segundo caso que en el primero; en términos de la ley, la respectiva proporción en peso de oxígeno a carbono en la segunda sustancia, *dividida* por la correspondiente en la primera es 2 : 1, razón ciertamente simple. Para la comprobación experimental de esta predicción se disponía de los datos necesarios de los pesos que se combinan, que eran aproximadamente:

En el ácido carbónico, 73 % de oxígeno y 27 % de carbono (en peso).
En el óxido carbónico, 57 % de oxígeno y 43 % de carbono.

Reduciendo estos porcentajes aproximados a proporciones utilizando cocientes entre números enteros pequeños, resulta:

En el ácido carbónico, razón de oxígeno a carbono, aproximadamente, 8 : 3.
En el óxido carbónico, razón de oxígeno a carbono, aproximadamente 4 : 3.
Por tanto, la razón entre estas proporciones es $(8 : 3) / (4 : 3) = 2$ (ó 2 : 1).*

Podrían haberse obtenido confirmaciones análogas de la ley de las proporciones múltiples mediante un tratamiento análogo de otros datos extraídos de trabajos científicos publicados anteriormente. Puede decirse que los hechos habían estado ante los ojos de todos, pero que la simplicidad que contenían estaba oculta porque anteriormente no había ninguna buena razón para buscarla. Hemos dicho frecuentemente que, sin la ayuda de una hipótesis que organice las percepciones, poca cosa puede verse; en cierto modo el viejo dicho «ver es creer» debería complementarse con otro, «creer es ver».

Como era de esperar, este descubrimiento de la ley de las proporciones múltiples estimuló gran cantidad de nuevas investigaciones. Dada una proporción cualquiera de pesos de dos sustancias en combinación, se podría planificar y predecir el análisis o la síntesis de otros compuestos de los mismos elementos. Los resulta-

* Sin embargo, la deducción no es concreta en dirección opuesta. Al ser la razón 2 : 1, podríamos llegar a la conclusión de que las dos fórmulas moleculares son CO y CO₂, o bien C₂O y CO. Dalton no dio ninguna regla explícita para resolver esta ambigüedad en tales casos, pero utilizó diversos procedimientos para determinar y evidenciar fórmulas moleculares. Véase el estudio de A. J. Bernatowicz, *Journal of Chemical Education*, agosto de 1970.

dos eran impresionantes, si bien hoy sabemos que el postulado de las razones «simples» resulta demasiado limitado y que también pueden intervenir números enteros *grandes*. Por ejemplo, en la estructura compleja de los compuestos orgánicos, que en su mayor parte eran entonces inaccesibles, cada molécula puede contener varias docenas de átomos de unas pocas sustancias por lo que la razón de las proporciones de carbono a hidrógeno no es tan sencilla para dos sustancias tales como $C_{23}H_{22}O_6$ y $C_{22}H_{42}O_3$.

Problema 20.2 En 1810 Dalton dio los resultados aproximados relacionados en la tabla siguiente para las densidades relativas de cinco gases (en su terminología), cuyas moléculas estaban constituidas únicamente por nitrógeno y oxígeno. También llegó a la conclusión de que el más ligero de estos gases estaba formado por moléculas que contenían sólo un átomo de N y otro de O.

a) Sobre la base de los datos de Dalton y sus hipótesis, decidir la fórmula molecular para cada uno de los restantes gases. b) Confirmar la ley de las proporciones múltiples para estos cinco gases.

Compuesto	Densidad relativa	Porcentajes en peso	
		nitrógeno	oxígeno
Gas nitroso (NO)	12,1	42,1	57,9
Óxido nitroso	17,2	59,3	40,7
Ácido nítrico	19,1	26,7	73,3
Ácido oxinitrico	26,1	19,5	80,5
Ácido nitroso	31,2	32,7	67,3

c) Otra consecuencia importante de la teoría de Dalton, sin la cual la física y la química moderna no podrían imaginarse, fue señalar el camino para la *determinación de pesos atómicos*. En palabras de Dalton, «un gran objetivo de este trabajo, es mostrar la importancia y ventaja de calcular los pesos relativos de las partículas últimas, tanto de los cuerpos simples como de los compuestos...», empresa que, previamente, no era posible ni siquiera tenía significado. Obsérvese que Dalton sólo pretendía determinar los pesos *relativos* de los átomos de sustancias diferentes; no se conocía ningún método seguro para determinar los pesos absolutos hasta que, en 1865, Loschmidt utilizó, con este propósito, los resultados de la teoría cinética. (Ahora sabemos que los átomos de los elementos poseen masas del orden de 10^{-24} g cada uno.)

Los historiadores han discutido durante algún tiempo la forma exacta con que Dalton llegó a calcular por vez primera sus pesos atómicos. El punto de vista más

reciente es que estaba intentando desarrollar una teoría mecánica de la solubilidad de gases en agua y encontró que para ello era importante determinar los tamaños y pesos de las partículas de los diferentes gases. Los apuntes de su libro de laboratorio demuestran que en septiembre de 1803 había calculado una tabla de pesos atómicos y moleculares (aunque esta tabla no fue publicada hasta 1805), y una explicación sistemática del método de construcción no apareció hasta 1808 en el *Nuevo Sistema*. Nuestro estudio anterior indicaba cómo podían obtenerse los pesos relativos de los átomos: a partir de los *pesos conocidos de los elementos de una sustancia que entran en una combinación* y de las *fórmulas moleculares supuestas*. Por ejemplo, de los datos indicados en el problema 20.2 resulta, como puede comprobarse de cinco maneras, que los pesos relativos de los átomos de nitrógeno y oxígeno guardan, aproximadamente, la relación 6 : 8,2 (actualmente con mejores experimentos resultan los valores 7 : 8, ó más exactamente, 14,008 : 16,000).

Del mismo modo podemos usar otros datos analíticos: Los pesos de hidrógeno y oxígeno que se combinan en la síntesis del agua de Dalton estaban en la relación 1 : 6 (más tarde 1 : 7, y en las medidas actuales casi 1 : 8) y, como la fórmula supuesta para el agua era HO (\odot O), resultaba para los pesos atómicos relativos el cociente 1 a 6. Teniendo en cuenta los diversos resultados de esta tipo, Dalton pudo reunir una tabla con los valores más probables de los pesos atómicos relativos (aunque las palabras «*masas* relativas que se combinan» hubieran sido más apropiadas). Refiriendo todos los valores al hidrógeno como unidad arbitraria, Dalton consiguió obtener unas tablas para la mayor parte de los elementos y compuestos entonces disponibles.* Una de sus primeras tablas (1808) daba los siguientes pesos atómicos relativos: hidrógeno, 1; nitrógeno, 5; carbono, 5; oxígeno, 7; fósforo, 9; azufre, 13; sosa («átomo compuesto», NaOH, hidróxido sódico), 28; y así sucesivamente.

Pronto resultó obvio a Dalton que al usar la regla de la máxima simplicidad aparecían incoherencias en la determinación de los pesos atómicos basados en diversos compuestos. En el caso específico del agua decía ya en 1810: «Después de todo cae dentro de lo posible que el agua sea un compuesto ternario» (H_2O o HO_2 , en lugar de HO). En el primer caso los pesos que se combinan en la proporción 1 : 8 para los dos gases indicarían que el peso atómico relativo del oxígeno es 16 si el del hidrógeno es 1; en el caso último, si $H = 1$, $O = 4$. Es concebible que con esta flexibilidad en la hipótesis de las fórmulas moleculares y eliminando contradicciones, se pueda llegar a alcanzar una serie de pesos atómicos coherentes (el proceso se ilustra en el problema siguiente). Pero antes de que ocurriera esto, se hicieron dos descubrimientos: uno en Francia y otro en Italia, que simplificaron, de un modo notable, esta tarea. Estos descubrimientos hicieron posible el abandono del postulado de Dalton de la mayor simplicidad que, si bien había sido esencial para co-

* Las tablas actuales utilizan el carbono como sustancia de referencia, de tal modo que el hidrógeno tiene ahora un peso atómico aproximado de valor 1,008; véase Apéndice III.

menzar la investigación de los pesos atómicos relativos, era cada vez más difícil de defender y se sentaron las nuevas bases de la química atómica.

Problema 20.3 En la siguiente tabla viene dada un conjunto de *pesos aproximados con que se combinan* cinco sustancias. Para cada una de ellas el principio de Dalton, de la mayor simplicidad, exigiría una estructura *binaria*, aunque, en efecto, la mayor parte de ellos son más complejos. Analizar estos datos y obtener, sin recurrir a otras ayudas y, exclusivamente, a partir de la coherencia de estos datos: a) un conjunto de las fórmulas moleculares más coherentes para todas estas sustancias, y b) un conjunto de los pesos atómicos más coherentes para todos los elementos que intervienen.

A continuación, consultar una colección de constantes de compuestos inorgánicos (como el *Handbook of Chemistry and Physics*) y determinar las fórmulas correctas y los nombres corrientes de estos compuestos.

Sustancia	Pesos que se combinan en gramos			
	Hierro	Azufre	Hidrógeno	Carbono
A	14			9
B		16	1	
C	7	8		
D		16		3
E		48	1	6

(Sugerencia: Comenzar por escribir, para cada una de las cuatro primeras sustancias, diversas fórmulas moleculares posibles y los pesos atómicos relativos de cada uno de estos casos tal como resultarían de los pesos que se combinan. A continuación, seleccionar el conjunto más coherente de pesos atómicos, y, con ello, se habrán decidido también las fórmulas moleculares más probables. Por último, como comprobación del esquema obtenido, volver a la última sustancia y determinar si ésta puede acomodarse al mismo.)

20.8 Ley de Gay-Lussac para los volúmenes de gases reaccionantes que se combinan

En 1808 Joseph Louis Gay-Lussac (sec. 19.3), un maestro de química experimental, había observado que el experimento de Cavendish de la explosión de los gases hidrógeno y oxígeno para la obtención del agua en forma de vapor podía interpretarse con una gran simplicidad. Al repetir el experimento, vio que 2 volúmenes de hidrógeno se *combinaban* con 1 volumen de oxígeno para formar 2 volúmenes de vapor de agua; y como este experimento se había llevado a cabo muy cuidadosamente, dedujo que la razón de los volúmenes que se combinaban de hidrógeno y oxígeno era la de 2 a 1, con un error menor de 0,1 %. Gay-Lussac recordó que los gases, como grupo, obedecen a leyes físicas simples y regulares, es decir, a las leyes de los gases ideales que son aproximadamente válidas para todos los gases y especuló que, por tanto, la combinación de gases (en volumen) podría estar regida, en general, por un conjunto de reglas simples. De su análisis de publicaciones anteriores y de su propia investigación precisa sacaba la conclusión siguiente: «Me parece que los gases se combinan siempre en las proporciones más simples cuando actúan uno sobre otro; y hemos visto en realidad en todos los ejemplos anteriores que la razón de combinaciones es 1 a 1, 1 a 2, ó 1 a 3». (A éstas añadiríamos actualmente otras razones simples en volumen, tales como 2 : 3). Además, notó que si el compuesto que resulta de la reacción química es gas o vapor a la temperatura del experimento, su volumen estaba relacionado, de un modo muy simple, con los volúmenes de los elementos que reaccionaban. Podemos escribir resultados de este tipo, de la siguiente forma:

1 vol. de nitrógeno + 3 vol. de hidrógeno \rightarrow 2 vol. de amoníaco

2 vol. de hidrógeno + 1 vol. de oxígeno \rightarrow 2 vol. de vapor de agua

1 vol. de nitrógeno + 1 vol. de oxígeno \rightarrow 2 vol. óxido nítrico

1 vol. de hidrógeno + 1 vol. de cloro \rightarrow 2 vol. ácido clorhídrico

Problema 20.4 Escribir un enunciado conciso de la ley de Gay-Lussac de los volúmenes que se combinan.

Esta maravillosa simplicidad nos atraería a primera vista, pero por muchas razones Dalton rechazó totalmente estos resultados hasta el final. Recordemos que su modelo de gases, para explicar la homogeneidad de la atmósfera, exigía que los átomos de elementos diferentes tuvieran tamaños diferentes. Aceptar la posibilidad de una tan general simplicidad, incluso ocasionalmente de volúmenes en combinación *iguales*, le parecía tanto como aceptar la noción de que volúmenes iguales de

diferentes gases (a la misma temperatura y presión) contienen el mismo número de átomos o bien múltiplos enteros unos de otros; esto, a su vez, establecía la posibilidad de que los átomos de los distintos elementos no difirieran en sus dimensiones, lo que, en consecuencia, significaría abandonar su modelo estático y lo que él suponía la «ley inmutable de Newton de los fluidos elásticos».

Dalton vio confirmados sus argumentos por el hecho de que sus propios experimentos (defectuosos) volumétricos contradecían los resultados de Gay-Lussac y que éstos, desde luego, admitían números no *exactamente* enteros (recordemos que las medidas científicas siempre entrañan alguna incertidumbre; y en estos ensayos delicados la probabilidad de error era a menudo considerable, aun cuando de hecho se reconoce, generalmente, que Gay-Lussac era un experimentador mucho más preciso que Dalton). Por tanto, Gay-Lussac había tenido que redondear sus cifras y para Dalton esta discrepancia no era un error experimental despreciable, sino la verdad más significativa. Esta disputa nos resume de manera brillante y compacta algunas características típicas de la vida de la Ciencia: la búsqueda de la simplicidad, la fascinación de los números enteros, la inexactitud de las medidas, el papel de una teoría para guiar e interpretar (a veces falsamente) resultados experimentales; en verdad, revivimos en esta ocasión algo de la disputa entre Galileo y los escolásticos acerca de la interpretación del movimiento de caída libre.

Al margen de las objeciones de Dalton, los resultados de Gay-Lussac no nos ayudan por sí mismos a interpretar directamente la teoría atómica de los gases de Dalton. Hacer la doble ensambladura requería enmendar la teoría, después de la cual, sin embargo, la hipótesis atómica emergía más fuerte que nunca, aproximadamente, en su estado actual.

20.9 Modelo de Avogadro para los gases

La reforma no tardó mucho en llegar; fue el trabajo del físico italiano Lorenzo Romano Amedeo Carlo Avogadro di Quaregna e di Cerreto (1776-1856), generalmente llamado Amedeo Avogadro (fig. 20.3). Su publicación penetrante, de 1811, aunque de redacción oscura, presenta un modelo de gases que puede analizarse en cinco partes distintas:

a) Como ya se había sugerido de un modo persistente por Gay-Lussac y otros, el modelo de Dalton para los gases, en el cual las partículas están en contacto, se sustituía por otro (no importa si es estático o cinético) en el cual las partículas sólo tienen una capa muy delgada de calórico y son muy pequeñas frente a la distancia que las separa. El volumen que ocupan realmente los átomos es, en consecuencia, mucho menor que en el modelo de Dalton y es, de hecho, una fracción despreciable del volumen total de la muestra que se considere. Podríamos decir que se trata de un regreso a la antigua imagen de Lucrecio de los gases constituidos por «átomos



Fig. 20.3 Amedeo Avogadro (1776-1856).

y vacío». Desde luego, con esta hipótesis debemos esperar obtener cualquier información acerca de las *dimensiones atómicas relativas* basándonos en los volúmenes en combinación. Pero este problema de dimensiones, tan importante para Dalton, se hace en seguida insignificante en esta formulación.

b) Contrariamente a las consideraciones iniciales de simplicidad o a las firmes creencias de Dalton o, en efecto, a toda expectativa razonable de la época, las partículas más pequeñas de los *elementos* gaseosos no eran simples átomos solitarios, sino que podían considerarse como formados por dos o más átomos químicamente semejantes «unidos por atracción para formar un todo simple». Llamando *molécula* a la menor de estas unidades, podemos imaginar que las moléculas del elemento *X* en forma gaseosa constan todas de dos átomos (gas diatómico) o, en el caso de algún elemento *Y*, de tres átomos (triatómico), o en el gas *Z*, de un átomo (monoatómico), etc. Sin embargo, mantenemos que, como las moléculas de un elemento están formadas (a lo sumo) de unos pocos átomos, resultan ser despreciablemente pequeñas en comparación con las distancias intermoleculares.

c) En un *compuesto gaseoso* (por ejemplo, vapor de agua) cada molécula consta, evidentemente, de números definidos de átomos químicamente distintos. Pero cuando dos gases se combinan (como ocurre en la formación del agua a partir del gas hidrógeno y oxígeno), no debemos *suponer* que simplemente una o más moléculas de hidrógeno y una o más moléculas de oxígeno se asocian formando una

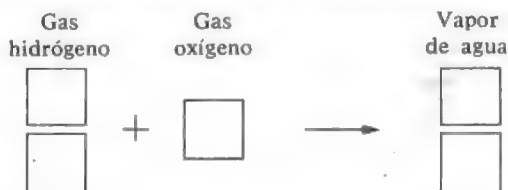
unidad nueva mayor; debemos examinar la posibilidad de que tal grupo se forma sólo durante un breve momento y que después se rompe rápidamente en dos o más partes iguales. Las diversas posibilidades pueden representarse simbólicamente del modo siguiente:



etcétera.

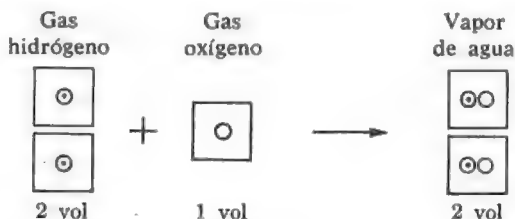
d) Pero la parte más importante de la contribución de Avogadro es un postulado, conocido ahora como *hipótesis o ley de Avogadro*, que dice: *Bajo las mismas condiciones de temperatura y presión, volúmenes iguales de todos los gases —ya sean simples compuestos o mezclas— contienen el mismo número de moléculas.* Avogadro no fue el primer científico en hacer esta proposición, pero tuvo el éxito de incorporarla en forma de una teoría convincente y coherente.

Volviendo a casos concretos, representemos, en primer lugar, los resultados experimentales de Gay-Lussac para el agua en forma simbólica:



Cada cuadrado representa una unidad de volumen, a una presión y temperatura dadas. De acuerdo con la ley de Avogadro, estos volúmenes iguales contienen el mismo número de moléculas. Por simplicidad, imaginemos que se trata de una sola molécula. Si con Dalton suponemos ahora que los gases hidrógeno y oxígeno son monoatómicos y que la reacción tiene lugar según la Ec. (1) anterior, obtenemos inmediatamente un resultado contradictorio, pues resulta imposible, sin dividir el propio átomo de oxígeno, situar en cada uno de los dos volúmenes de vapor de agua toda una molécula del mismo material. Las Ecs. (2) y (3) deben rechazarse por una razón similar. Si creemos suficientemente en la hipótesis de Avogadro para

admitir la posibilidad de que una de las otras ecuaciones representa la verdadera reacción, podemos volver a la hipótesis de que el hidrógeno es, ciertamente, monoatómico, pero que el oxígeno es diatómico; aplicando, entonces, la Ec. (4) y llenando nuestros cuadrados,

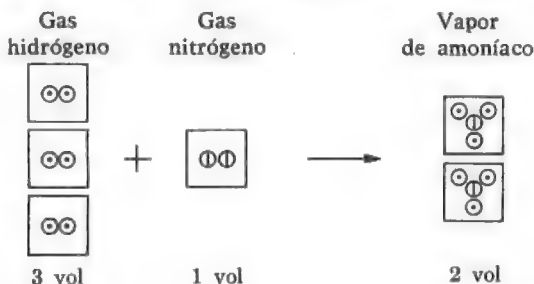


resulta una reacción que, evidentemente, está en armonía con las esperanzas de la hipótesis de Avogadro y con los resultados experimentales de Gay-Lussac.

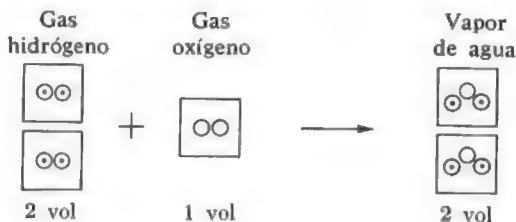
Sin embargo, las ecuaciones (6) y (7) y otras muchas que pueden imaginarse serían *también* compatibles con estos dos factores. Evidentemente, existe un número ilimitado de tales posibilidades; al abandonar la reacción demasiado simple de Dalton $H + O = HO$ por ser falsa, hemos descubierto demasiadas alternativas que pueden ser correctas. No obstante, podemos excluir algunas de ellas considerando cómo se comportan estos gases en otras reacciones. De los experimentos de Gay-Lussac conocemos la siguiente relación de volúmenes en la producción de vapor de amoníaco:

3 vol. de hidrógeno + 1 vol. de nitrógeno = 2 vol. de amoníaco.

Este resultado nos demuestra en seguida que el hidrógeno no puede ser monoatómico si cada volumen unitario de amoníaco ha de tener el mismo número de moléculas que cada volumen unitario de hidrógeno, ya que ello llevaría consigo la conclusión imposible de que una molécula de amoníaco contiene $1\frac{1}{2}$ átomos de hidrógeno. Sin embargo, el resultado experimental armoniza con la hipótesis de Avogadro si el *hidrógeno es diatómico* y el nitrógeno es también diatómico; pues, en este caso, podemos escribir: $3H_2 + N_2 \rightarrow [N_2H_6] \rightarrow 2NH_3$, o



Al rechazar la monoatomicidad del gas hidrógeno, negamos automáticamente la Ec. (4) para la producción de vapor de agua. La Ec. (5) es imposible porque interfiere con los resultados de Gay-Lussac sobre los volúmenes que se combinan (demuéstrese). Así, la Ec. (6) resulta como la más simple que puede todavía ser correcta:



e) En este punto el propio Avogadro, muy apropiadamente, supone también una «regla de simplicidad»; es decir, consideraba que el proceso correcto era aquel que, siendo compatible con otras reacciones químicas, era el más simple y estaba en armonía con los resultados de Gay-Lussac y con su propio postulado. Por tanto, elige la Ec. (6) preferentemente a la (7) y la (8) y las restantes que puedan construirse siguiendo esta pauta. Pero este resultado es —y fue— quizás un poco desalentador, pues esperábamos actuar sin reglas arbitrarias de esta clase. Sin embargo, hay esta diferencia: la regla de Dalton al asignar las fórmulas moleculares basadas en datos prácticamente incompletos, había dado lugar a conflictos, mientras que la regla de Avogadro de la simplicidad puede utilizarse como un criterio final de elección *una vez* considerados todos los conflictos conocidos.

Problema 20.5 Resumir las etapas teóricas y experimentales que conducen al resultado de que la fórmula de las moléculas de vapor de agua es H_2O y no HO como Dalton pensaba originalmente. ¿Es H_2O la única posibilidad basada en estas evidencias? Si no es así, ¿por qué se acepta, generalmente, como la fórmula correcta?

Problema 20.6 Un sistema utilizado, frecuentemente, para engendrar hidrógeno a gran escala en una planta portátil exige la siguiente reacción: Un volumen unitario de alcohol tratado con 1 vol. de vapor de agua produce 1 vol. de dióxido de carbono y 3 vol. de gas hidrógeno. Demostrar que, en consecuencia, la fórmula molecular del alcohol es CH_3OH (alcohol de madera).

Problema 20.7 Demostrar que la reacción $\text{N}_2 + \text{O}_2 \longrightarrow 2\text{NO}$ es compatible tanto con los postulados de Avogadro como con el experimento volumétrico de

Gay-Lussac, de la formación de NO, óxido nítrico. ¿Por qué podemos asegurar que esta reacción no se describe correctamente por la ecuación $N + O \rightarrow NO$? Dado que la producción de óxido nítrico (N_2O) se describe por la ecuación $2N_2 + O_2 \rightarrow 2N_2O$, ¿qué relación volumétrica puede predecirse para esta reacción?

Problema 20.8 Aceptando la hipótesis de Avogadro, demostrar que el resultado experimental siguiente está en armonía con la proposición de que los gases hidrógeno y cloro son diatómicos y en contradicción con la idea primitiva de que eran monoatómicos:



20.10 Evaluación de la teoría de Avogadro

En resumen, veamos las siguientes características del esquema de Avogadro:

a) Al contrario que Dalton, aceptaba como correctos los resultados de Gay-Lussac y demostró que los trabajos de ambos investigadores eran mutuamente compatibles dentro del error experimental.

b) Reemplazó el modelo estático según el cual los átomos están en contacto y llenan todo el espacio por otro modelo en el que las moléculas (posiblemente formadas por dos o más átomos) son muy pequeñas comparadas con el espacio que las separa. Esta hipótesis, que era necesaria para explicar por qué un gas de grandes moléculas podía ocupar el mismo espacio que un número igual de pequeñas moléculas, resultó ser también esencial para la teoría cinética de los gases desarrollada más tarde en el mismo siglo.

c) Al postular que los elementos gaseosos pudieran tener moléculas formadas por varios átomos, Avogadro no ofrecía una explicación de por qué los átomos químicamente idénticos del gas de algunos elementos se unen en grupos de dos o tres, etc; ciertamente, esta proposición contradecía directamente la idea de que los átomos de un gas ejercen fuerzas *repulsivas* entre sí. Sin embargo, si entre átomos iguales podían existir fuerzas atractivas, ¿por qué éstas no hacían que se condensara todo el conjunto del gas? Sobre tales bases, el mismo Dalton, en 1809, había desechado como absurda la idea de que los elementos gaseosos tuviesen como «partículas» más pequeñas, grupos de dos o más átomos. Y ya nadie prestó atención a esta posibilidad. A partir de 1811, los químicos comenzaron a considerar que la estabilidad de moléculas como las del agua, fuese debida a cargas eléctricas, positivas

o negativas, ligadas a los átomos de los distintos elementos. Pero por los estudios sobre electricidad se sabía que las cargas eléctricas del mismo signo se repelen mutuamente. Por consiguiente, ¿cómo dos átomos de hidrógeno, que podían suponerse con cargas del mismo signo y, por tanto, repeliéndose mutuamente, se unían firmemente para formar una molécula? La contestación a este interrogante sólo se dio en las últimas décadas, con la ayuda de la teoría cuántica (cap. 29), que permite explicar por qué átomos de ciertos elementos forman moléculas biatómicas, triatómicas, etc.

d) El modelo de gases de Avogadro sólo servía para explicar las reacciones de los cuatro elementos que se conocían en forma gaseosa (nitrógeno, oxígeno, hidrógeno y cloro), con tal que se considerasen formados por moléculas diatómicas. La teoría de Avogadro podía, por tanto, haber sido aceptada si hubiera requerido simplemente el postulado de que todos los elementos fueran diatómicos en estado gaseoso, sin más explicación. Pero las cosas no eran tan simples. Posteriormente, fue posible experimentar a temperaturas más elevadas, a las cuales los elementos mercurio, fósforo, arsénico y azufre están en estado gaseoso, pero para éstos el modelo de Avogadro sólo servía en la hipótesis de que sus moléculas *no* fueran todas diatómicas sino que las fórmulas moleculares fuesen Hg , P_4 , As_4 y, según la temperatura, S , S_2 , S_6 y S_8 .

¿Por qué esta diversidad? Queriendo simplificar, ¿había introducido Avogadro la confusión? En realidad, la comprobación independiente del número de átomos en una molécula de material gaseoso llegó a corroborar plenamente la hipótesis de Avogadro; pero esto sólo se consiguió mucho más tarde mediante la teoría cinética de los gases, que se verá en el cap. 22.

e) Pocas posibilidades parecía tener la idea de que durante la reacción de los gases se formaban moléculas inestables intermedias que se rompían en seguida en dos o más fragmentos iguales. Aunque hoy sabemos que las etapas intermedias en tales reacciones son mucho más complejas, es cierto que la notable intuición de Avogadro estaba más próxima a los hechos que la concepción de sus contemporáneos.

f) Pese a que Avogadro en su ley aseguraba que volúmenes iguales de todos los gases, en las mismas condiciones de presión y temperatura, tienen el mismo número de moléculas, no establecía el modo de determinar este número. Simplemente, decía que era muy grande. Experimentos realizados en muchas ramas de la física desde entonces, habían dado indirectamente valores que estaban bastante de acuerdo. Así, para un gas a 0°C y a la presión de 1 atm, el valor actualmente aceptado es de $2,69 \times 10^{19}$ moléculas por cm^3 . Mayores volúmenes contendrán, proporcionalmente, números superiores; por ejemplo, 22,4 litros a dichas presión y temperatura contendrán $6,02 \times 10^{23}$ moléculas (un número que resultará de gran importancia en las consecuencias). Aunque la hipótesis de Avogadro y estos valores son

sólo correctos en los gases ideales, se aplican bastante bien a los gases reales no demasiado densos o demasiado próximos al punto de licuación.

g) En su época constituyeron dos importantes obstáculos a la aceptación inmediata del trabajo de Avogadro la forma confusa de su presentación y la amplia mezcla de otras conclusiones atrevidas, que resultaron erróneas.

20.11 La química después de Avogadro: concepto de valencia

Algunos de los puntos mencionados en las secciones anteriores, ayudaron a explicar por qué los trabajos de Avogadro pasaron inadvertidos durante muchos años, en los cuales la química, inicialmente incentivada con las contribuciones de Dalton, progresó vigorosamente. Pero esta actividad tiene un resultado inevitable: la obtención de gran número de datos experimentales que ponían de manifiesto la insuficiencia del esquema de Dalton. En consecuencia, mientras la contribución de Avogadro quedaba arrinconada, se debatían acaloradamente otras posibles enmiendas a los esquemas conceptuales de Dalton. Sin embargo, seguían existiendo defectos fundamentales, p. ej., la persistente hipótesis de que los átomos de un gas son contiguos. El desaliento a causa de las inevitables contradicciones parece haber iniciado hacia 1840 una pérdida gradual de confianza en toda la teoría atómica de la Química.

La solución a estas dificultades comenzó en 1858, cuando el químico italiano Stanislao Cannizzaro hizo resurgir la teoría de Avogadro y demostró, en parte a través de sus propios experimentos, que proporcionaba una base lógica para el desarrollo de la química. Ésta era la fase final de la revolución química, cuyo resultado fue el desarrollo y aclaración de muchos de los conceptos fundamentales en que se apoya la química moderna. Pero el éxito de Cannizzaro hay que atribuirlo también a un poderoso aliado. Por aquel tiempo, los químicos estaban mejor preparados para aceptar un modelo cinético de los gases, a causa de la revolución que se iniciaba en la física: el abandono de la teoría del calórico y la creciente aceptación de la teoría cinética de los gases en dicho campo.

La teoría atómica de Dalton ofrece una interpretación muy simple de la ley empírica de las proporciones definidas. Cada molécula de monóxido de carbono, por ejemplo, consta siempre de un átomo de carbono y uno de oxígeno, y cada molécula de amoníaco consta, invariablemente, de un átomo de nitrógeno combinado con tres átomos de hidrógeno y lo mismo ocurriría con toda molécula de cualquier compuesto. Sin embargo, al considerar estas notables regularidades, pronto surgen algunas preguntas: ¿Por qué los átomos se combinan de esta manera determinada? ¿Por qué razón los átomos de H y Cl forman siempre la molécula de HCl y no HCl₃, H₃Cl₂ o cualquier otra combinación? ¿Por qué los átomos de hidrógeno y

oxígeno forman H_2O o H_2O_2 (peróxido de hidrógeno), pero no H_2O_3 ?; o, dados C y O, ¿por qué se forman CO o CO_2 , pero no C_2O ?

Para responder a estas cuestiones podemos imaginar a los átomos dotados de una especie de «ganchos» que sirven para acoplarse o ligarse unos a otros. Para explicar la existencia de moléculas como HCl y H_2O , asignamos un «gancho» al átomo de hidrógeno, uno al de cloro y dos al de oxígeno (figura 20.4). La diferencia entre la estructura del H_2O y H_2O_2 se ve entonces directamente. Además, podemos interpretar la imposibilidad de un compuesto tal como H_2O_3 , como signo de que los átomos de H y O, en cierto modo, no forman una molécula estable hasta que sus «ganchos» estén todos ocupados. La fórmula CO_2 nos dice que cada átomo de carbono tiene cuatro «ganchos» y que se ocupan dos con cada átomo de oxígeno. Pero según esto, en el CO , dos de los cuatro «ganchos» del átomo de carbono están sin ocupar y, por tanto, disponibles para ser ocupados con los correspondientes a un átomo de oxígeno, una explicación simple del hecho de que el monóxido de carbono es un poderoso agente reductor (y muy peligroso en un espacio cerrado, en el cual puede competir con los organismos vivos en la captura del oxígeno disponible).

Últimamente, este tipo de analogía ha resultado incompleto y peligroso. La cuestión de las potencias de combinación de los átomos ha de responderse en fun-

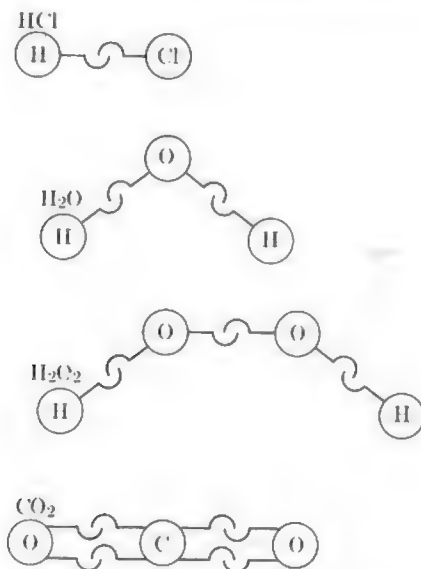


Fig. 20.4 Representación esquemática del enlace en las moléculas. No debe imaginarse que todas las moléculas están realmente en una línea como se representa aquí.

ción de la estructura de los propios átomos. Sin embargo, mientras no podamos utilizar este tipo de respuesta, el método general indicado en la figura 20.4 tiene un gran valor formal, aunque en sus principios era, fundamentalmente, un artificio descriptivo. Señaló el camino que condujo, en 1852, al concepto de *valencia*, hoy día indispensable para la descripción y comprensión de los fenómenos químicos.* La valencia de un elemento —hablando con sencillez— es el número de «ganchos» que un átomo puede disponer para asociarse químicamente con otros átomos o con grupos estables de átomos. El hidrógeno se considera a priori con valencia 1; decimos que es *monovalente*. El modo más sencillo de determinar la valencia de un elemento es considerar la fórmula molecular de alguna sustancia (si existe) en la que figure solamente el elemento y el hidrógeno. Por ejemplo, las fórmulas H_2O , NH_3 , y CH_4 , indican que la valencia del oxígeno es 2 (divalente), la del nitrógeno, 3 (trivalente), y la del carbono, 4 (tetravalente). La fórmula H_2SO_4 indica que el radical sulfato SO_4 es divalente. La valencia puede también determinarse viendo el número de átomos de hidrógeno que el átomo del elemento puede *desplazar* en una molécula. Así, en el CaO , Ca reemplaza el H_2 de H_2O ; por tanto, el calcio es divalente. Las fórmulas moleculares HF o H_2F_2 , para el ácido fluorhídrico y OsF_8 para el octafluoruro de osmio, indican que el osmio puede tener una valencia de 8, que es la valencia más alta que se conoce. Igualmente, a partir del NaCl , CaCl_2 , AlCl_3 , SnCl_4 , PCl_5 y WCl_6 se deducen las valencias del $\text{Na} = 1$, $\text{Ca} = 2$, $\text{Al} = 3$, $\text{Sn} = 4$, $\text{P} = 5$ y $\text{W} = 6$.

Este proceso de enumeración, sin embargo, conduce a dificultades. El carbono es tetravalente y el oxígeno divalente en el ensayo anterior. No obstante, vimos que formaban CO . El número total de «ganchos» disponibles no se utiliza y las valencias de las dos partes de la molécula no se equilibran. Debemos decir que dos de los cuatro enlaces de valencia del C no se utilizan en el CO , o bien que la valencia del carbono es, efectivamente, 2 en el CO y 4 en el CO_2 . En líneas generales, es preferible este último modo de expresión, aunque conduce a la realidad desalentadora de que el carbono y muchos otros elementos pueden tener diferentes valencias según la molécula que ayudan a formar. Los óxidos de nitrógeno (N_2O , NO , N_2O_3 , NO_2 , N_2O_5) indican que el nitrógeno puede poseer los números de valencia 1, 2, 3, 4 y 5, respectivamente (en todos ellos $\text{O} = 2$).

Por el mismo argumento, la valencia del hierro es 2 en el FeO , FeCl_2 y $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$, y 3 en Fe_2O_3 , FeCl_3 y $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$. El uranio puede tener cinco valencias distintas, el cloro seis y el renio siete. Históricamente, este elemento de variabilidad dio lugar a múltiples debates a lo largo de la segunda mitad del siglo XIX.**

* Los libros modernos de química han comenzado a abandonar el término *valencia* y a usar, en su lugar, expresiones como *capacidad de combinación*.

** El concepto de valencia llevó consigo otras dificultades. Por ejemplo, un compuesto tiene, a veces, un número de valencia anómalo como el Fe_3O_4 . Es probable que esto sea debido a una mezcla de dos estados de valencia: FeO y Fe_2O_3 .

De las muchas consecuencias que se deducen del concepto de valencia existe una particularmente digna de notarse. La idea de valencia de enlace, esencialmente la misma que la de los «ganchos» de la fig. 20.4, completa la representación pictórica de los átomos según Dalton e invita a especular acerca de cómo están dispuestos los átomos de una molécula, particularmente en las sustancias orgánicas complejas donde la imaginación necesitaba mayor apoyo. Esto era urgente porque se habían descubierto series de *isómeros*,* es decir, sustancias que tienen la misma fórmula química, pero diferentes propiedades físicas y químicas, y el único modo de explicar estas diferencias, es imaginar que, aunque la naturaleza y número de átomos de la molécula en un conjunto de isómeros sea la misma, la disposición de los átomos, dentro de la molécula, es diferente. De ahí el mayor despliegue de las fórmulas estructurales gráficas para representar productos químicos como los indicados en la fig. 20.5 para el C_2H_6 (etano), C_2H_6O (alcohol etílico, mejor escrito C_2H_5OH), el famoso caso del C_6H_6 (benceno; obsérvese el anillo cerrado) y los isómeros $C_6H_{12}O_6$, uno de los cuales es la glucosa (también llamada dextrosa y azúcar de uva) y el otro la fructosa (o levulosa, azúcar de fruta).

En 1860, cuando las fórmulas estructurales se utilizaban corrientemente entre los químicos, había cierta repugnancia a considerarlas como algo más que simples

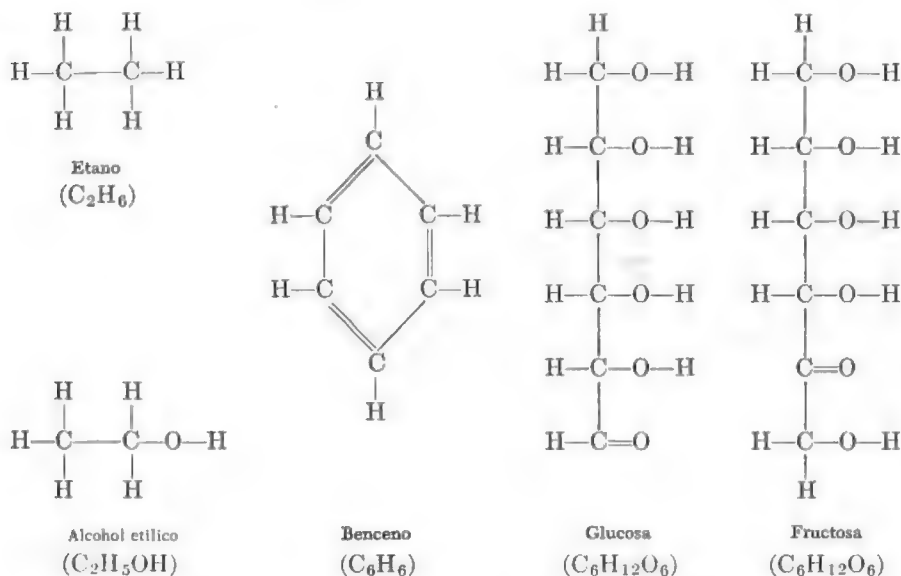


Fig. 20.5 Fórmulas estructurales de algunos compuestos orgánicos.

* Del griego *isos* + *meros* (compuestos de partes iguales).

ayudas mentales sin una relación necesaria con su estructura real tridimensional, entonces totalmente inaccesible. Aunque las fórmulas gráficas han demostrado ser indispensables para una primera representación de las moléculas, la correcta disposición de los átomos y grupos estables de átomos en la molécula de un compuesto, es difícil, generalmente, de determinar aún con nuestros poderosos instrumentos de investigación y, aunque la estructura de todos los compuestos fuera conocida con mayor exactitud, esto no nos daría la solución al enigma inicial: ¿Por qué los átomos se combinan en tales compuestos limitados y específicos y cuál es el mecanismo físico que mantiene juntos los componentes de una molécula? Estas cuestiones, como otras muchas relacionadas, fueron contestadas sólo mucho más tarde, una vez quedó aclarada la estructura física del átomo. Mientras, el concepto de valencia constituía la piedra fundamental de otro esquema inspirado, *la clasificación periódica de los elementos*, que había de constituir un avance de la química tanto como la teoría atómica.

Problema 20.9 Evaluar la teoría atómica de Dalton para la química desde el punto de vista de nuestros criterios en las teorías del capítulo 3.

Problema 20.10 Discutir el crecimiento de la hipótesis atómica a la luz del capítulo 12.

20.12 Pesos moleculares*

Conocido un método más racional para la obtención de fórmulas moleculares, es inmediata la extensión y corrección de la tabla de pesos atómicos relativos. Para los gases, el método es especialmente simple. Si, por ejemplo, comparamos (a igual temperatura y presión) los *pesos relativos de volúmenes iguales* de diversos gases, encontraríamos, experimentalmente, las siguientes masas relativas: 2,016 para el hidrógeno, 28,01 para el nitrógeno y, aproximadamente, 32,00 para el oxígeno. Si adoptamos la escala física de pesos atómicos basada en un isótopo del carbono (véase a continuación la sec. 27.1), encontramos para el oxígeno una masa relativa de 32,00 con cuatro cifras significativas. Con esta base podemos reunir en una tabla los pesos moleculares relativos de algunas moléculas gaseosas —para elementos, así como para compuestos— (tabla 20.1).

Los *pesos atómicos relativos* se obtienen rápidamente dividiendo el peso molecular del elemento (véase tabla 20.1) por el número de átomos que posee la mo-

* Esta sección completa el estudio de la teoría atómica de Dalton, pero puede omitirse sin pérdida de continuidad.

Tabla 20.1 Pesos moleculares relativos*

Gas o vapor	Peso molecular relativo (M)	Fórmula molecular
<i>Elementos:</i>		
Hidrógeno	2,016	H ₂
Helio	4,003	He
Nitrógeno	28,01	N ₂
Oxígeno	32,00	O ₂
Flúor	38,00	F ₂
Argón	39,95	A
Cloro	70,90	Cl ₂
Fósforo	123,90	P ₄
Mercurio	200,59	Hg
<i>Compuestos:</i>		
Vapor de agua	18,02	H ₂ O
Monóxido de carbono	28,01	CO
Dióxido de carbono	44,01	CO ₂
Hexafluoruro de uranio	352,02	UF ₆
<i>Mezclas:</i>		
Aire	29 (valor medio aproximado)	N ₂ (78 %), O ₂ (21 %), CO ₂ (0,03-0,04 %), también de vapor de agua, gases nobles, etc.

lécula; las fórmulas moleculares requeridas se obtienen de la naturaleza de las reacciones químicas, especialmente de las relaciones volumétricas de gases, como se ha demostrado. Una lista completa de los valores modernos para todos los elementos se encuentra en la tabla del Apéndice IV.

Problema 20.11 Utilizando los valores de los pesos atómicos que figuran en el Apéndice IV, calcular los pesos moleculares del alcohol metílico (de madera)

* En un sentido menos estricto de la palabra, el término «peso molecular» se utiliza, incluso, para mezclas gaseosas (como el aire) o para las moléculas de un sólido o líquido en donde puedan existir o no en grupos y en donde las fórmulas moleculares, en consecuencia, difícilmente tienen el mismo significado que en el caso de los gases.

CH_3OH ; alcohol etílico, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$; éter dietílico $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$; quinina $(\text{C}_{20}\text{H}_{24}\text{N}_2\text{O}_2)$; glucosa, $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$, y arcilla $[\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2(\text{SiO}_2) \cdot 2(\text{H}_2\text{O})]$.

Problema 20.12 ¿Hay alguna evidencia química, en lo que se ha visto, de que la fórmula molecular para el hidrógeno sea H_3 ? ¿Qué tipo de experimento se necesitaría para probar o desechar esta hipótesis? Si resultase ser H_3 , ¿qué nos dirían los experimentos citados en este capítulo, acerca de las fórmulas moleculares de los otros gases? ¿Cómo se modificarían los pesos moleculares dados anteriormente?

En el problema 20.3 se obtuvieron exclusivamente, a partir de la consistencia interna de los datos de los pesos que se combinan, las fórmulas moleculares probables de cinco compuestos. Obsérvese que de éstos, dos eran sólidos, uno líquido y dos gaseosos. Más tarde vimos que el trabajo de Gay-Lussac y de Avogadro complementaba y simplificaba mucho tales cálculos, al menos para las reacciones gaseosas. Estos enfoques hicieron posible, evidentemente, una determinación completa de todos los pesos atómicos. Ahora debemos hacer más explícita la relación entre estos tres importantes factores de cualquier reacción, a saber: los pesos que se combinan, la fórmula de la reacción, y los pesos atómicos y moleculares de las sustancias que intervienen. *Conocidos dos de estos factores, el tercero puede calcularse.* Estos dos ejemplos ayudarán a ilustrar esto.

Ejemplo 1. En la reducción del mineral de hierro, hematites, se obtiene hierro calentando carbono con el mineral según la siguiente reacción:



Dada esta ecuación y los pesos atómicos ($\text{Fe} = 55,85$, $\text{O} = 16,00$, $\text{C} = 12,01$), determinar los pesos que se combinan.

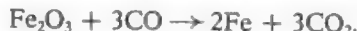
Solución: Las proporciones siguientes representan la relación en peso de las sustancias que intervienen:

<i>Hematites</i>	<i>Carbono</i>
$[(55,85) \times 2 + (16,00) \times 3]$	$[3 \times 12,01]$
<u>159,70</u>	<u>36,03</u>
<i>Hierro</i>	<i>Monóxido de carbono</i>
$\rightarrow [2 \times 55,85]$	$+ [3 \times (12,01 + 16,00)]$
$\rightarrow 111,70$	$+ 84,03$

Este esquema nos dice que si deseamos obtener 112 g de hierro, debemos suministrar al horno 160 g de mineral, 36 g de carbón puro (o su equivalencia), y tomar las precauciones para el desprendimiento de 84 g de gas monóxido de carbono.

Problema 20.13 ¿Cuántas toneladas de carbono deben utilizarse para obtener 80 toneladas de hierro?

Problema 20.14 Según sea la temperatura del horno, otra reacción posible es



¿Cuáles son los pesos relativos de los cuerpos que participan en esta reacción?

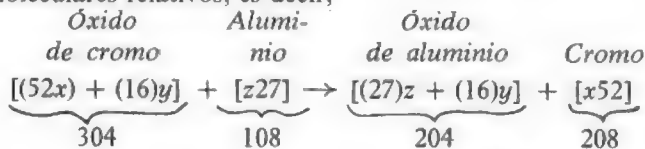
Ejemplo 2. Cuando se pone en ignición una mezcla consistente en 304 g de un determinado óxido de cromo y 108 g de aluminio (p. a. del Al = 27), se producen 208 g de cromo puro (p. a. del Cr = 52) y óxido de aluminio. A partir de estos datos, hallar la ecuación de esta reacción.

Solución: El principio de conservación de la masa nos sirve para deducir que se producen $(304 + 108) - 208$ g, o sea, 204 g de óxido de aluminio. Aunque no se nos haya dado ninguna fórmula, podemos intentar escribir la ecuación para la reacción de la forma



donde x , y y z representan el número de los distintos átomos que intervienen. Que debe haber tantos átomos de cada elemento en ambos lados de la ecuación, resulta del postulado de que los átomos son indivisibles e inmutables; esto es, la ecuación debe estar *equilibrada*.

Consideremos ahora los pesos relativos que se combinan como un indicativo de los pesos moleculares relativos, es decir,



$$z \cdot \text{Al} = 108 \quad \text{o} \quad z(27) = 108; \quad z = \frac{108}{27} = 4,$$

$$x \cdot \text{Cr} = 208 \quad \text{o} \quad x(52) = 208; \quad x = \frac{208}{52} = 4.$$

Por tanto,

$$\text{Cr}_x\text{O}_y = \text{Cr}_4\text{O}_y = [(4 \times 52) + (y \times 16)] = 304;$$

$$y = \frac{304 - 208}{16} = 6.$$

Nuestra ecuación de reacción es, por consiguiente,



Más simplemente, $2\text{Cr}_2\text{O}_3 + 4\text{Al} \rightarrow 2\text{Al}_2\text{O}_3 + 4\text{Cr}$ y, dividiendo todo por 2, resulta, finalmente,



Problema 20.15 Antiguamente, el aluminio se obtenía por reducción del cloruro de aluminio con sodio metálico (p. a. del Na = 23), lo que daba origen a cloruro sódico y aluminio (p. a. del Al = 27). La experiencia muestra que 66,8 g de cloruro de aluminio se combinan completamente con 34,5 g de sodio metálico para producir 13,5 g de aluminio y cloruro de sodio. Sin que se dé por adelantado ninguna fórmula molecular concreta, hallar la ecuación más simple que describiría esta reacción. (*Nota:* Para obtener x , y y z en forma entera hay que multiplicar todas estas magnitudes por cierto número.)

Finalmente, debemos mencionar un concepto que sirve para simplificar muchos cálculos: es el de *molécula-gramo* o *mol* de una sustancia. Es una medida de la cantidad de materia o masa: decir que tenemos una molécula-gramo o un mol de sustancia, significa que tenemos M gramos de ella, donde M es numéricamente igual a su peso molecular. Así, para el oxígeno (O_2), 1 mol es igual a 32,000 g; para el hidrógeno (H_2), 1 mol es 2,016 g; 3 moles de mercurio = 601,77 g de mercurio (es decir, $3 \times 200,59$); obsérvese que para sustancias monoatómicas el término «peso molecular-gramo» debe sustituirse por «peso atómico-gramo»), n moles de agua = $n \times 18,016$ g de agua. Inversamente, si una sustancia tiene el peso molecular M , entonces y g de dicha sustancia corresponden a y/M moles.

El concepto de *mol* es de especial utilidad cuando se observa que *todos los elementos puros y los compuestos, ya sean gases, líquidos o sólidos, deben tener el mismo número de moléculas en un mol* cualquiera que sea su estado, temperatura y presión. La prueba es simple: La masa total de una sustancia (m) es igual a la masa por molécula (m_0) \times número de moléculas (N_m), o sea, $m = m_0 N_m$. Si se toma la masa igual a 1 mol, resulta numéricamente igual al peso molecular

M ; por tanto, $M = m_0 N_m$. Si comparamos entre sí dos sustancias de pesos moleculares M' y M'' , resulta

$$\left. \begin{aligned} M' &= m'_0 N'_m \\ M'' &= m''_0 N''_m \end{aligned} \right\}$$

y, por tanto

$$\frac{M'}{M''} = \frac{m'_0}{m''_0} \cdot \frac{N'_m}{N''_m}.$$

Por definición, la relación m'_0/m''_0 representa el peso molecular relativo de una sustancia respecto a la otra, o sea $M'/M'' = m'_0/m''_0$. Por consiguiente, $N'_m = N''_m$, como se quería demostrar. Además, el número real de moléculas por mol, obtenido por muchos experimentos indirectos, es $6,02 \times 10^{23}$ (*número de Avogadro*, N).

Recordemos que a 0°C y 1 atm de presión todos los gases puros contienen $2,69 \times 10^{19}$ moléculas por cm^3 . Es ahora evidente que bajo estas condiciones normales $6,02 \times 10^{23}$ moléculas ocupan un volumen de $(6,02 \times 10^{23})/(2,69 \times 10^{19}) = 22,4 \times 10^3 \text{ cm}^3 = 22,4$ litros. Esto nos lleva a otro modo corriente de establecer la ley de Avogadro: *un mol de cualquier gas contiene $6,023 \times 10^{23}$ moléculas y ocupa un volumen de 22,4 litros en las condiciones normales de presión y temperatura.*

El argumento siguiente revela también cómo el concepto de *mol* es de gran utilidad. Si en alguna reacción química en particular, sabemos que cada una de las moléculas de la sustancia A se une con x moléculas de la sustancia B , se sigue que debemos tomar por cada *mol* de A , x *moles* de B para tener una reacción completa.

Ejemplo 3. Sabemos que una sustancia X se forma por combinación de *números iguales* de moles de dos elementos. Cuando se analizan 40 g de X , resulta que contiene, aproximadamente, 35,5 g de cloro y 4,5 g de un elemento sin identificar Y ; la cantidad citada de cloro es $\frac{1}{2}$ mol, ya que

$$n = \frac{m}{M} = \frac{35,5 \text{ g}}{71 \text{ g/mol}} = \frac{1}{2} \text{ mol}.$$

Por tanto, los 4,5 g de Y representan también $\frac{1}{2}$ mol de Y , con lo cual su peso molecular será $Y = 9$. Si Y es monoatómico, éste será su peso atómico; si es diatómico, el peso atómico será 4,5; si es triatómico, 3, etc. Un vistazo a la tabla de pesos atómicos muestra que, en efecto, sólo existe una de estas posibilidades, a saber: el berilio (Be) con un peso atómico 9 (o, más exactamente, 9,01). Así identificamos la sustancia X en la forma BeCl_2 .

Problema 20.16 ¿Cuántos moles de amoníaco (NH_3) corresponden a 1 g de aquel vapor? ¿Cuántas moléculas? ¿Cuántos átomos? ¿Cuál sería el volumen que

ocuparía 1 g de ese vapor a 0°C y 1 atm?, ¿a 100°C y 5 atm de presión? ¿Cuántos moles de hidrógeno hay en 1 g de amoníaco? (Utilizar la ley general de los gases).

Problema 20.17 La reacción que representa la oxidación del hierro, puede escribirse así:



¿Cuántos moles de hidrógeno se liberan por cada gramo de hierro completamente oxidado?

Problema 20.18 Conocido el número de Avogadro, los pesos moleculares de ciertos gases y sus fórmulas moleculares, calcular la masa «absoluta» (en gramos) de un simple átomo de hidrógeno, de oxígeno y de cloro.

Textos recomendados para lecturas posteriores

H. A. Boorse y L. Motz (editores), *The World of the Atom*, New York: Basic Books, 1966. Extractos y discusión de los escritos de Dalton, Gay-Lussac, Avogadro y Prout, págs. 139-191. (Véanse extractos semejantes en el libro de Hurd y Kipling que se recomienda más abajo.)

H. Butterfield, *The Origins of Modern Science*, capítulo 11.

D. L. Hurd y J. J. Kipling, *The Origins and Growth of Physical Science*, vol. 2, páginas 19-36, 46-80. Extractos de los escritos de Dalton, Gay-Lussac y Avogadro.

L. K. Nash, «The atomic-molecular theory», págs. 215-321 en *Harvard Case Histories in Experimental Science* (editado por J. B. Conant), Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1948. Existe en forma de separatas.

Fuentes, interpretaciones y trabajos de referencia

A. J. Bernatowicz, «Dalton's rule of simplicity», *Journal of Chemical Education*, volumen 47, págs. 577-579 (1970).

D. S. L. Cardwell (editor), *John Dalton and the Progress of Science*, New York: Barnes & Noble, 1968. Artículos presentados en una reunión con motivo del bicentenario del nacimiento de Dalton.

Ida Freund, *The Study of Chemical Composition*, capítulos III-XIII.

F. Greenaway, *Jonh Dalton and the Atom*, Ithaca: Cornell University Press, 1967.

H. Guerlac, «Some Daltonian Doubts», *Isis*, vol. 52, págs. 544-554 (1961).

A. J. Ihde, *The Development of Modern Chemistry*, New York: Harper & Row, 1964, capítulos 4 y 6.

D. M. Knight, *Atoms and Elements, a Study of Theories of Matter in England in the Nineteenth Century*, London: Hutchinson, 1967.

L. K. Nash, «The origins of Dalton's chemical atomic theory», *Isis*, vol. 47, páginas 101-116 (1956).

W. G. Palmer, *A History of the Concept of Valency to 1930*, New York: Cambridge University Press, 1965.

J. R. Partington, *A History of Chemistry*, vol. IV, London: Macmillan, 1964.

A. L. Smyth, *John Dalton 1766-1844: A Bibliography of Works by and About Him*, Manchester, England: Manchester University Press, 1966.

A. W. Thackray, «The emergence of Dalton's chemical atomic theory», *British Journal for the History of Science*, vol. 3, págs. 1-23 (1966); «Documents relating to the origins of Dalton's chemical atomic theory», *Memoirs of the Manchester Literary and Philosophical Society*, vol. 108, nº 2, págs. 1-22 (1966); «The origin of Dalton's chemical atomic theory: Daltonian doubts resolved», *Isis*, vol. 57, páginas 35-55 (1966).

BIBLIOTECA IIS

Capítulo 21

El sistema periódico de los elementos

21.1 Investigaciones sobre la regularidad en la lista de los elementos

Cuando en el siglo XIX el número de elementos conocidos fue haciéndose cada vez mayor y sus propiedades físicas y químicas quedaban cada vez mejor establecidas, surgió, naturalmente, la necesidad de encontrar alguna relación entre aquéllos que los agrupase de un modo sistemático (problema análogo al que condujo a las leyes de Kepler, para el sistema solar).

A primera vista, la tarea podría parecer descorazonadora. Lo inmediatamente más chocante es que cada elemento parece tener propiedades únicas que lo diferencian de los demás. La mayoría son sólidos en circunstancias ordinarias, pero muchos son gases y algunos son líquidos; sus abundancias relativas en la Tierra tienen valores muy diversos, así como sus características físicas —punto de ebullición, densidad, etc. A pesar de todo, existen ciertos indicios que inducen a especular. Ya en 1815-1816 el físico inglés William Prout sugirió que los átomos de todos los elementos no eran sino condensaciones de diferentes números de átomos de hidrógeno, siendo éste la única partícula verdaderamente fundamental. Según esto, los pesos atómicos deberían ser múltiplos enteros del peso atómico del hidrógeno; y, realmente, esta consecuencia de la hipótesis de Prout, venía apoyada por los valores primitivos de los pesos atómicos determinados por Dalton. Sin embargo, determinaciones más precisas, por ejemplo las de Berzelius, Dumas y Stas, ponían de manifiesto una marcada desviación respecto a la regla de Prout. De hecho, sólo algunos de los pesos atómicos eran, aproximadamente, múltiplos enteros del peso atómico del hidrógeno, como puede mostrar una rápida ojeada a la tabla moderna y precisa de los elementos. Así, la hipótesis de Prout, a pesar de su simplicidad, tuvo que rendirse a las evidencias contrarias del análisis cuantitativo. (Debe notarse, sin

embargo, que gran parte de este análisis cuantitativo se realizó justamente con el propósito de comprobar la hipótesis de Prout, la cual debe juzgarse, por tanto, como útil a la ciencia, a pesar del hecho de que fuese finalmente rechazada.)

Pero al mismo tiempo, estos resultados crecientes favorecieron otra línea de pensamiento que puso orden en la lista, aparentemente azarosa, de elementos, intentando relacionar los pesos atómicos de los elementos con sus propiedades químicas. Desde hacía mucho tiempo se conocía que, entre los distintos elementos, existen «familias» de análogo comportamiento químico. Un ejemplo es la *familia de los halógenos*, que incluye los elementos flúor (F), cloro (Cl), bromo (Br) y yodo (I); sus respectivos pesos atómicos son, aproximadamente, 19, 35,5, 80 y 127. Aunque estos cuatro elementos presentan algunas marcadas diferencias (por ejemplo, los dos primeros son gases en las condiciones ordinarias, el tercero líquido y el último sólido volátil), tienen también mucho en común. Todos ellos se combinan con muchos metales para formar sales cristalinas blancas (*halógeno* significa «formador de sal»). Los puntos de ebullición varían progresivamente al pasar del primero al último (F, -187°C ; Cl, -35°C ; Br, 59°C ; I, 184°C), y lo mismo ocurre con sus puntos de fusión. La solubilidad en agua decrece progresivamente, sucediendo lo mismo con la actividad química, manifestada por la violencia de las reacciones químicas (velocidad de reacción, energía liberada).

Esta lista de propiedades que relaciona a los halógenos con variaciones continuas viene complementada por una segunda relación de propiedades que son las mismas para todos estos elementos. Los halógenos forman compuestos de fórmulas semejantes en reacción violenta con los metales (NaF, NaCl, NaBr y NaI, o AlF_3 , AlCl_3 , AlBr_3 y AlI_3); es decir, los cuatro elementos de la familia tienen la misma valencia con respecto a cualquier otro elemento. Con el hidrógeno, los cuatro forman compuestos simples que se disuelven en el agua y forman ácidos. Los cuatro, al vaporizarlos en condiciones ordinarias, tienen moléculas diatómicas.

Otra familia de elementos químicos, llamada de los *metales alcalinos*, incluye el litio (Li), sodio (Na), potasio (K), rubidio (Rb) y cesio (Cs), con pesos atómicos aproximados de 7; 23; 39; 85,5 y 133. También para ellos existe una larga lista de propiedades físicas y químicas que son comunes a todos los miembros de la familia o varían progresivamente con sus pesos atómicos.

En la búsqueda, sin descanso, de relaciones cuantitativas entre los elementos, debe destacarse al químico alemán Johann Wolfgang Döbereiner, quien en 1829 notó que, para algunas familias químicas, los pesos atómicos de cualquier elemento eran iguales o aproximadamente iguales al peso atómico medio de sus dos vecinos inmediatos. Así, para los metales alcalinos, 23 del Na es el promedio del 7 del Li, y el 39 del K; y en la triada Cl, Br e I, el 80 del Br es, aproximadamente, el promedio de 35,5 (Cl) y 127 (I). Pero no se podría dar ningún significado físico a tal regularidad numérica que recordaba la ley de Bode. De hecho, la explicación de dichas relaciones resultaba complicadísima (comportando la estabilidad de los núcleos) y aún no ha podido darse del todo. Sin embargo, la búsqueda de regulari-

dades numéricas de este tipo tuvo, como siempre, seguidores y se trabajó en ello con entusiasmo. Es éste otro ejemplo en el que, durante un tiempo, la investigación siguió un camino erróneo y a pesar de ello fue fructífera, ya que a través de este esfuerzo se hizo más evidente que la lista de elementos tenía una estructura general significativa, aun cuando no correspondiera a tales grupos de pesos atómicos.

Desde 1860, aproximadamente cuando la agitación de Cannizzaro en favor de la teoría atómico-molecular de Avogadro comenzó a triunfar, era posible, en principio, determinar con mucha precisión los pesos atómicos de casi todos los elementos y los pesos moleculares de los compuestos. Ahora podían situarse los elementos en una secuencia basada enteramente en una propiedad del mismo átomo, como era su peso atómico. Tal secuencia revela un hecho curioso: se puede descubrir un espaciado regular entre los elementos que pertenecen a una familia, una recurrencia de posición numérica completamente distinta de las triadas de pesos atómicos de Döbereiner. En palabras de químico inglés J. A. R. Newlands, uno de los que investigaron esta regularidad, «el octavo elemento, partiendo de uno dado, es una especie de repetición del primero, como la octava nota en una octava musical».

La esperanzadora sugerencia de Newlands tenía validez muy limitada. Aunque era correcto que elementos químicamente semejantes se repetían periódicamente, y pese a que fue posible señalar algunas «octavas» en la disposición de Newlands, no preveía que la periodicidad variaba al avanzar suficientemente en la lista de los elementos, ni consideraba la necesidad de dejar espacios vacíos en la ordenación, para colocar elementos aún sin descubrir. Se podría objetar a esto que, antes del descubrimiento de nuevos elementos, no hay modo de saber dónde dejar hueco para ellos. Pero éste fue, exactamente, el mérito del gran químico ruso Mendeleiev.

21.2 El primitivo sistema periódico de los elementos

En las publicaciones del gran químico ruso Dimitri Ivanovitch Mendeleiev (1834-1907) a partir de 1869 —y algo más tarde las del químico alemán Julius Lothar Meyer— encontramos la culminación de las seis décadas de investigaciones cuantitativas e inducciones especulativas que comenzaron con la teoría atómica de Dalton. Examinemos ahora alguno de los aspectos más sorprendentes de la contribución de Mendeleiev en extractos de sus voluminosos trabajos. En un artículo de 1869, discutía así los fundamentos materiales de su obra:

«Durante el curso del desarrollo de nuestra ciencia, la disposición sistemática de los elementos ha sufrido numerosos y repetidos cambios. La clasificación más corriente de los elementos en metales y no metales, está basada en las diferencias físicas que se observan en muchos de los cuerpos simples, así como en diferencias de carácter de los óxidos y de los compuestos que les corresponden. Sin embargo, lo que en un primer contacto con la materia parece completamente claro, pierde



Fig. 21.1 Dimitri Ivanovitch Mendeleiev (1834-1907).

su importancia cuando se adquiere un conocimiento más detallado. Desde que se conoció que un elemento, tal como el fósforo, podía aparecer en forma no metálica o en forma metálica, fue imposible establecer una clasificación fundada en diferencias físicas... Hasta hace poco la mayoría de los químicos se han inclinado en favor de una ordenación correcta de los elementos según sus valencias. Pero hay implicada mucha incertidumbre en estos intentos...

»Así pues, no existe todavía un único principio universal que pueda resistir la crítica, que sirviera como guía para juzgar las propiedades relativas de los elementos y permitiese su ordenación en un sistema más o menos estricto. Solamente para algunos grupos de elementos, no hay duda de que forman un todo y representan una serie natural de manifestaciones semejantes de la materia. Tales grupos, son: los halógenos, los metales alcalinotérreos, el grupo del nitrógeno, parcialmente también el grupo del azufre, los compañeros del platino, los del cerio y algunos más...

El descubrimiento del rubidio, del cesio y del talio, hicieron pensar que nuestro conocimiento de los elementos es muy limitado; y todo intento de construir un sistema parece ser prematuro por cuanto no existen hipótesis básicas que sirvan de fundamento de un sistema estricto.

»Las investigaciones relativas a las relaciones simples de los pesos atómicos, se han encaminado muchas de ellas, en particular las de Dumas, Pettenkofer, Sokolow y otros, a señalar las relaciones numéricas entre los pesos atómicos de los elementos que forman un grupo; pero por lo que sé, no han conducido a una disposición sistemática de todos los elementos conocidos... Cuando me decidí a escribir un libro de química titulado *Fundamentos de la química*, me hice el propósito de establecer un sistema de elementos, guiándome, para su clasificación, no en razones accidentales o instintivas, sino en algún principio exacto y definido. Por lo que se ha dicho antes, podemos ver la casi completa ausencia de relaciones numéricas que sirvan para la construcción de un sistema de elementos; todo sistema, sin embargo, que se base en relaciones numéricas observadas exactamente será, desde luego, preferible a otros, porque así sólo se deja pequeño margen a la arbitrariedad. Los datos numéricos disponibles, relativos a los elementos, son muy limitados ahora. Aunque las propiedades físicas de algunos de ellos se han determinado con precisión, esto es cierto solamente para un pequeño número de elementos. Propiedades tales como las ópticas, y aun las eléctricas o magnéticas, no pueden servir como base para un sistema natural, puesto que un mismo cuerpo, según el estado en que se encuentre, puede presentar enormes diferencias en este aspecto. Referente a esto, baste recordar el caso del grafito y el diamante, el fósforo ordinario y el rojo... Sin embargo, todos saben que cualquiera que sea el cambio de las propiedades de un elemento, *algo* permanece inmutable, y que cuando los elementos se reúnen en compuestos, este algo material representa la característica (común) a todos los compuestos que ese elemento dado puede formar. En ese aspecto, solamente se conoce un valor numérico y es el peso atómico del elemento. La magnitud del peso atómico, de acuerdo con la naturaleza esencial y real del concepto, es algo que no se refiere al estado actual de un elemento, sino que pertenece a aquella parte material suya, parte que tiene en común con el elemento libre y con todos sus compuestos... Por esta razón, me he ocupado en buscar un sistema, basándome en los pesos atómicos.

»El primer intento que hice en esta dirección, fue el siguiente: seleccioné los cuerpos de pesos atómicos más pequeños y los ordené de acuerdo con sus magnitudes. Con esto, vi que aparecía una periodicidad en sus propiedades y en la valencia, un elemento sigue a otro, siguiendo una secuencia aritmética:

Li = 7	Be = 9,4	B = 11	C = 12	N = 14	O = 16	F = 19
Na = 23	Mg = 24	Al = 27,4	Si = 28	P = 31	S = 32	Cl = 35,3
K = 39	Ca = 40	Ti = 50	V = 51	(etcétera).»	

Notemos que en esta ordenación, el hidrógeno, que es el primer elemento y el más ligero, se omite, pues tiene propiedades más bien únicas. Notemos también que el helio, y otros elementos de la familia de los *gases nobles*, no habían sido aún descubiertos; y que Mendeleiev atribuyó a los pesos atómicos valores que en algunos casos difieren bastante de los valores más recientes. Él, había colocado los siete elementos primeros, desde el litio hasta el flúor, siguiendo los pesos atómicos crecientes, y entonces escribió los siete siguientes, desde el sodio al cloro, en una segunda fila. La periodicidad de su comportamiento químico, aparecía ya de un modo claro antes de escribir la tercera fila. En la primera columna vertical se encuentran los dos primeros metales alcalinos; en la séptima, los dos primeros halógenos; y cada una de las columnas comprendidas entre ellas contiene dos elementos químicamente similares. Además, las valencias principales de estas columnas son 1 para la primera, 2 para la segunda, 3 para la siguiente, y después 4, 3, 2 y 1. Leyendo de izquierda a derecha, todo elemento (le daremos el símbolo general R) de cada columna puede formar óxidos o hidruros superiores de acuerdo con el esquema siguiente:

<i>Columna</i>	<i>Óxido superior o hidruro</i>
1.º	R_2O
2.º	$R_2O_2 (= RO)$
3.º	R_2O_3
4.º	$R_2O_4 (= RO_2) H_4R$
5.º	H_3R
6.º	H_2R
7.º	HR

Cuando Mendeleiev agregó una tercera fila de elementos, el potasio (K) se colocó debajo de los elementos Li y Na, que son miembros de la misma familia y tienen la misma valencia, 1. El siguiente era el Ca, divalente como el Be y el Mg, que están en la misma columna. En el próximo lugar de la derecha, debía aparecer un elemento de peso atómico inmediatamente superior. De los elementos conocidos en aquel tiempo, el de peso atómico más próximo era el titanio (Ti), que fue colocado en este lugar, bajo el Al y B, por otros investigadores que habían intentado desarrollar este esquema. (En la tabla de Newlands, que tiene una gran coincidencia con la de Mendeleiev hasta aquí, aparece en este espacio un elemento cuyo peso atómico real era mucho más elevado.) Aquí es donde mejor podemos darnos cuenta de la idea dominante de Mendeleiev. Él sabía que el Ti tiene propiedades quími-

cas semejantes a las del C y Si y, por tanto, debía colocarse en la *cuarta* columna vertical. Entonces, si la clasificación ha de ser completa y tener algún significado, debía existir algún elemento hasta entonces desconocido, de peso atómico comprendido entre el del Ca (40) y Ti (50, el valor actual es 47,9), y de valencia 3. Era ésta una predicción definida, y aún encontró Mendeleiev otros casos de este tipo entre los elementos restantes.

El esquema completo de lo hecho hasta aquí, puede ilustrarse mejor con una vulgar analogía. Supongamos un librero que fuese pesando cada uno de los libros individualmente, colocándolos en una serie de estanterías, de acuerdo a sus pesos crecientes, y encontrase que, en cada estantería, el primer libro que aparecía era de arte, el segundo de filosofía, el tercero de ciencias, el cuarto de economía, y así sucesivamente. Él no podría encontrar una explicación razonable de esta regularidad asombrosa, pero si viese, por ejemplo, que en la tercera estantería los libros estaban en el orden arte-ciencias-economía, quizás se viera tentado a dejar un hueco entre dos libros de arte y ciencias sospechando que debe existir un libro de filosofía del peso correcto para llenar este hueco.

Mendeleiev no se hacía ilusiones de llegar a entender por qué los elementos podían ordenarse de esta manera, pero creía firmemente que su trabajo conduciría a una explicación física, y que, mientras tanto «podía despertarse el interés en la determinación de pesos atómicos, en el descubrimiento de nuevos elementos, y en el hallazgo de nuevas analogías entre los mismos». Más tarde decía: «del mismo modo que sin conocer la causa de la gravitación, se puede hacer uso de la ley de gravitación, así también, para los fines de la química, es posible sacar ventaja de las leyes descubiertas por los químicos, aun sin ser capaces de explicar sus causas». El artículo original continúa:

«Yo presento ahora uno de los muchos sistemas de elementos basados en los pesos atómicos. Forman un intento de representar los resultados que pueden alcanzarse en esta dirección. Estoy totalmente consciente del hecho de que este intento no será el último, pero a mí me parece que expresa muy claramente la aplicabilidad del principio que he propuesto para todos los elementos cuyo peso atómico se ha determinado con cierta seguridad. Por encima de todo, mi interés era la determinación de un sistema general de los elementos.»

En la tabla 21.1 se representa el sistema periódico de Mendeleiev o «tabla periódica» de los elementos, en la forma que tenía en 1872. Observemos la distribución de los 63 elementos conocidos (con cinco dudosos), en doce filas horizontales o *series*, partiendo del elemento más ligero, el hidrógeno, en la parte superior izquierda y terminando con el uranio, en la parte inferior de la derecha. Todos aparecen en orden de los pesos atómicos crecientes (los valores de Mendeleiev figuran entre paréntesis), pero están colocados de modo que los elementos con propiedades

Tabla 21.1 Clasificación periódica de los elementos (Mendeleiev, 1872)*

Grupo	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Óxidos superiores e hidruros	R ₂ O —	RO —	R ₂ O ₃ —	RO ₂ H ₄ R	R ₂ O ₅ H ₃ R	RO ₃ H ₂ R	R ₂ O ₇ HR	RO ₄ —
1	H(1)							
2	Li(7)	Be(9,4)	B(11)	C(12)	N(14)	O(16)	F(19)	
3	Na(23)	Mg(24)	Al(27,3)	Si(28)	P(31)	S(32)	Cl(35,5)	
4	K(39)	Ca(40)	—(44)	Ti(48)	V(51)	Cr(52)	Mn(55)	Fe(56), Co(59), Ni(59), Cu(63)
5	[Cu(63)]	Zn(65)	—(68)	—(72)	As(75)	Se(78)	Br(80)	
6	Rb(85)	Sr(87)	? Yt(88)	Zr(90)	Nb(94)	Mo(96)	—(100)	Ru(104), Rh(104), Pd(106), Ag(108)
7	[Ag(108)]	Cd(112)	In(113)	Sn(118)	Sb(122)	Te(125)	I(127)	
8	Cs(133)	Ba(137)	? Di(138)	? Ce(140)	—	—	—	
9	—	—	—	—	—	—	—	
10	—	—	? Er(178)	? La(180)	Ta(182)	W(184)	—	Os(195), Ir(197), Pt(198), Au(199)
11	[Au(199)]	Hg(200)	Tl(204)	Pb(207)	Bi(208)	—	—	
12	—	—	—	Th(231)	—	U(240)	—	

* Los pesos atómicos se indican entre paréntesis. Las líneas horizontales en las casillas indican elementos «ausentes» que Mendeleiev esperaba se descubrieran en el futuro.

químicas semejantes estén en la misma columna o *grupo*. Así, en el grupo VII están todos los halógenos; en el grupo VIII, solamente los metales dúctiles; en los grupos I y II, los metales ligeros y de bajo punto de fusión; y en el grupo I, la familia de los metales alcalinos. Los argumentos detallados para justificar la colocación de cada elemento en su lugar particular, según indica el extenso estudio de Mendeleiev, son a menudo muy delicados y están guiados por su profundo y casi intuitivo conocimiento de la naturaleza química.

En la tabla aparecen aún muchos huecos, como indican los guiones horizontales: «Los espacios vacíos corresponden a elementos que quizá sean descubiertos en el transcurso del tiempo». Y son dudosos varios elementos del final de esta tabla: «Los pesos atómicos más elevados pertenecen a los elementos que apenas se encuentran en la Naturaleza, que no forman grandes depósitos, y que, por esto, se han estudiado relativamente poco... Respecto a la posición de algunos de estos elementos que se encuentran raramente en la Naturaleza, existe (cosa muy razonable), gran incertidumbre».

Pero la parte principal de la tabla está casi completa y revela, por sí misma, otra característica de este esquema, y es que: «para una verdadera comprensión de la materia es muy importante notar que todos los aspectos de la distribución de los elementos, de acuerdo a sus pesos atómicos, expresa, esencialmente, una única dependencia fundamental —*las propiedades periódicas*—». Por esto se significa que, además de la variación gradual en las propiedades físicas y químicas, dentro de cada grupo vertical o familia, también existe un cambio periódico de tales propiedades entre los elementos de una secuencia horizontal. «Las propiedades de los elementos, lo mismo que las formas y propiedades de sus compuestos, dependen periódicamente, o (para expresarlo algebraicamente) son función periódica, de los pesos atómicos de los elementos.» Esta *ley periódica* es el núcleo fundamental; es una generalización de la sugerencia de Newlands (cuya labor desconocía inicialmente Mendeleiev). Podemos ver mejor el significado de la ley periódica construyendo, como hizo Lothar Meyer, una curva de los valores de alguna magnitud física en función del peso atómico. En la figura 21.2 se representa una gráfica de este tipo, tomando los llamados *volúmenes atómicos* de los elementos, definidos por el cociente entre el peso atómico de la sustancia y su densidad, en su fase sólida o líquida. Obsérvese el espaciado irregular de las «ondas» y, sin embargo, la periodicidad simultánea de la posición de elementos análogos en la curva que se limita aquí concretamente a los halógenos y a los metales alcalinos.

Problema 21.1 Usando los datos que aparecen en *Handbook of Chemistry and Physics* o un libro similar, hacer una gráfica de los puntos de fusión de los elementos en función de sus pesos atómicos, desde el hidrógeno hasta el bario (Ba) inclusive. Estudiar luego las periodicidades que aparezcan en las gráficas, como pueden ser las posiciones de los metales alcalinos y los halógenos.

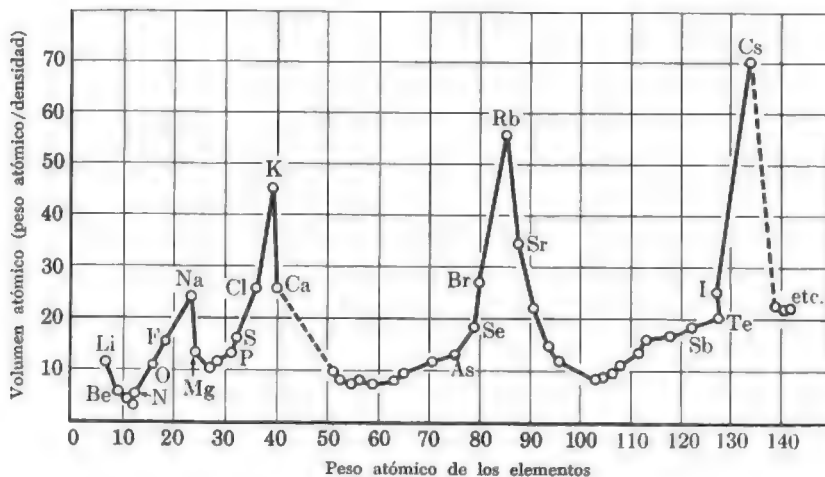


Fig. 21.2 Volúmenes atómicos en la primera porción de la Tabla de los elementos (según Lothar Meyer, pero usando valores modernos).

21.3 Consecuencias de la ley periódica

Un examen más detallado del sistema periódico nos ofrece una mayor información.

a) Si un elemento R se combina químicamente con el oxígeno, la composición de uno de sus compuestos más oxigenados viene determinada por el *grupo* al que pertenece R, es decir, el primer grupo nos da R_2O , el segundo R_2O_2 (o RO), el siguiente R_2O_3 , y así sucesivamente; igualmente, las combinaciones con hidrógeno vienen indicadas en la parte superior de la tabla 21.1.

b) Como se indica en la tabla 21.1, se ha establecido una distinción entre las series de números pares e impares, por un pequeño desplazamiento de los símbolos a la derecha o izquierda, respectivamente. Las semejanzas químicas y físicas suelen ser más estrechas entre todos los elementos de un grupo que pertenezca a la serie par solamente o a la serie impar solamente. Así, en el grupo VI, el S, Se y Te son no metales, en tanto que el Cr, Mo y W son metales pesados.

c) Cada elemento pertenece, a la vez, a una familia (columna vertical), y a una serie, línea horizontal en la clasificación periódica. De este modo, toda propiedad de un elemento está relacionada con el resto de la tabla, de igual modo que en un crucigrama cada letra está relacionada con las palabras verticales y horizontales del

mismo. Y así, sus propiedades pueden deducirse de las que se conocen de los elementos próximos. Daremos un ejemplo, sacado del libro de Mendeleiev.

«Si se encuentran en un grupo de elementos R_1, R_2, R_3 y si en la serie que contiene a uno de estos elementos, por ejemplo al R_2 , el elemento Q_2 le precede y el T_2 le sigue, las propiedades de R_2 están determinadas por la media de las propiedades de R_1, R_3, Q_2 y T_2 . Así, por ejemplo, el peso atómico de $R_2 = \frac{1}{4}(R_1 + R_3 + Q_2 + T_2)$. En el caso del selenio, que se encuentra en el grupo del azufre (p. a. 32) y el telurio (p. a. 127), y en la serie 5.^a, le antecede el arsénico (p. a. 75) y el bromo (p. a. 80) le sigue. Por tanto, el peso atómico del selenio debería ser $\frac{1}{4}(32 + 127 + 75 + 80) = 78,5$, que es muy próximo al valor, generalmente aceptado, de 79, en el cual existe un posible error en la primera cifra decimal, con lo que 78,5 aún puede estar más próximo al valor real)».

Veamos en seguida a qué conduce esto:

«La dependencia periódica de las propiedades de los elementos respecto a sus pesos atómicos, proporciona un *método nuevo para determinar*, mediante el peso equivalente, *los pesos atómicos* o atomicidad de aquellos elementos que se conocen, pero han sido poco estudiados, y a los cuales no podría aplicarse ningún otro método para determinar sus pesos atómicos verdaderos. En este tiempo (1869) en que la ley periódica ha sido propuesta por vez primera, había muchos elementos en este caso. De esta forma fue posible determinar sus pesos atómicos que fueron confirmados en investigaciones posteriores. Entre los elementos de este tipo estaban el indio, uranio, cerio, itrio y otros... Así pues, una ley verdadera de la Naturaleza anticipa hechos, predice magnitudes, da dominio sobre la Naturaleza y conduce a mejoras de los métodos de investigación, etc.»

d) Pero existe otra consecuencia mucho más importante:

«[Las] propiedades del selenio pueden determinarse también por este método; por ejemplo, el arsénico forma H_3As , el bromo HBr , y es evidente que el selenio, que se encuentra entre los dos, debe dar H_2Se con propiedades intermedias entre las de H_3As y HBr . Incluso las propiedades físicas del selenio y sus compuestos, no hablemos de su composición, estando determinadas por el grupo en que se encuentra, pueden preverse con gran aproximación a partir de las propiedades del azufre, del telurio, del arsénico y del bromo. *De este modo, es posible predecir* las propiedades de elementos aún no conocidos, especialmente cuando a su alrededor se encuentran elementos bien conocidos. Por ejemplo, en la posición IV, 5 (esto es, en el grupo IV y en la serie 5.^a), falta un elemento. Estos elementos desconocidos se representan colocando a la primera sílaba del elemento que le precede en el mismo grupo, el prefijo *eka*, que en sánscrito significa *uno*. El elemento IV, 5, sigue (en

la misma columna) al elemento IV, 3, que es el silicio; por tanto, llamo a este elemento desconocido ekasilicio, y su símbolo es Es. Después, habrá que ver las propiedades que ha de tener este elemento teniendo en cuenta las del silicio, estaño, cinc y arsénico, que son conocidas. Su peso atómico será, aproximadamente, 72, formará un óxido superior, EsO_2 , y un óxido inferior, EsO , formará compuestos, de fórmula general, EsX_4 , y compuestos más bajos, y químicamente inestables, de la forma EsX_2 . Dará compuestos volátiles organometálicos; por ejemplo $\text{Es}(\text{CH}_3)_4$, $\text{Es}(\text{CH}_3)_3\text{Cl}$ y $\text{Es}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$ que hervirán a unos 160° , etc.; también dará un cloruro líquido volátil, EsCl_4 , que hervirá a unos 90° y de densidad 1,9. EsO_2 será el anhídrido de un ácido coloidal débil, el Es metálico se obtendrá fácilmente de sus óxidos y del K_2EsF_6 , por reducción; el EsS_2 se asemejará al SnS_2 y al SiS_2 y, probablemente, será soluble en sulfuro amónico; la densidad del Es será próxima a 5,5 y la del EsO_2 , próxima a 4,7, etc...»

Este resumen de sus propias predicciones, en 1871, muestra patentemente su genio y profundidad y la amplitud y poder de su esquema. En 1887, C. Winckler, de Friburgo, descubrió un metal, llamado germanio (Ge) con las siguientes propiedades: peso atómico, alrededor de $72 \frac{1}{2}$ y densidad $5,5 \text{ g/cm}^3$; forma un óxido GeO_2 , de densidad $4,7 \text{ g/cm}^3$; forma un compuesto organometálico, $\text{Ge}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$, que hierve a unos 160°C ; forma cloruro líquido GeCl_4 , con su punto de ebullición a 83°C y densidad, $1,9 \text{ g/cm}^3$, etc. De modo similar, Mendeleiev describía las propiedades que ha de tener este elemento teniendo en cuenta las del silicio, estaño, mados ahora galio y escandio y, de nuevo, sus predicciones resultaron correctas.

Aun cuando no todos los aspectos del trabajo de Mendeleiev ofrecieran un acuerdo tan maravilloso, constituyen resultados verdaderamente pasmosos (recuerdan, una vez más, el descubrimiento de los asteroides en las órbitas generales que para ellos predecía la ley de Bode). Predicciones numéricas de este tipo constituyen la verdadera esencia de la Ciencia y la profesión química pronto dejó a un lado su inicial reticencia a asimilar los conceptos principales de una clasificación periódica de los elementos.

21.4 La moderna tabla periódica

Faltan por decir algunas modificaciones y adiciones que posteriormente se hicieron en la tabla periódica. La tabla 21.2, es una de sus formas más modernas; comparándola con la de Mendeleiev, se revelan las siguientes diferencias:

a) El hidrógeno está colocado de modo que no esté directamente asociado a ninguna familia; de hecho está relacionado químicamente tanto con los metales alcalinos como con los halógenos.

Tabla 21.2. Tabla periódica de los elementos*

Grupo →		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	O
Período	Serie	I H								
1	1	1,0080								2 He 4,003
2	2	3 Li 6,940	4 Be 9,013	5 B 10,82	6 C 12,011	7 N 14,008	8 O 16,0000	9 F 19,00		10 Ne 20,183
3	3	11 Na 22,991	12 Mg 24,32	13 Al 26,98	14 Si 28,09	15 P 30,975	16 S 32,066	17 Cl 35,457		18 A 39,944
4	4	19 K 39,100	20 Ca 40,08	21 Sc 44,96	22 Ti 47,90	23 V 50,95	24 Cr 52,01	25 Mn 54,94	26 Fe 55,85	27 Co 58,94
		29 Cu 63,54	30 Zn 65,38	31 Ga 69,72	32 Ge 72,60	33 As 74,91	34 Se 78,96	35 Br 79,916		28 Ni 58,71
5	5	37 Rb 85,48	38 Sr 87,63	39 Y 88,92	40 Zr 91,22	41 Nb 92,91	42 Mo 95,95	43 Tc [99]	44 Ru 101,1	45 Rh 102,91
		47 Ag 107,880	48 Cd 112,41	49 In 114,82	50 Sn 118,70	51 Sb 121,76	52 Te 127,61	53 I 126,91		46 Pd 106,4
		55 Cs 132,91	56 Ba 137,36	57-71 Serie de los lantánidos**	72 Hf 178,50	73 Ta 180,95	74 W 183,86	75 Re 186,22		76 Os 190,2
6	6	79 Au 197,0	80 Hg 200,61	81 Tl 204,39	82 Pb 207,21	83 Bi 208,98	84 Po 210	85 At [210]		77 Ir 192,2
		87 Fr [223]	88 Ra 226,05	89- Serie de los actínidos**						78 Pt 195,09
7	10									86 Rn 222
		57 La 138,92	58 Ce 140,13	60 Nd 144,27	61 Pm [147]	62 Sm 150,35	64 Gd 157,26	65 Tb 158,93	66 Dy 162,51	67 Ho 164,94
		89 Ac 227	90 Th 232,05	92 U 238,07	93 Np [237]	94 Pu [242]	96 Cm [245]	97 Bk [249]	98 Cf [253]	99 E [255]
										101 Md [256]
										102 No [256]
										70 Yb 173,04
										68 Er 167,27
										71 Lu 174,99

* Serie de los lantánidos:

** Serie de los actínidos:

* Los pesos atómicos son los más recientes (1961) adoptados por la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada. Todos los números son relativos al peso del principal isótopo del carbono ^{12}C , definido como exactamente 12,00000. Para los elementos producidos artificialmente, el peso atómico aproximado del isótopo más estable viene dado entre paréntesis. Los nombres completos de los elementos vienen indicados en el Apéndice III.

b) En cada casilla se coloca el símbolo del elemento, de modo que los de cada línea vertical pertenecen a la misma familia química. A los elementos se les atribuyen números consecutivos, llamados *números atómicos*, para indicar sus posiciones en la tabla periódica. Varios elementos poseen pesos atómicos más correctos y nuevos lugares.

c) Se habían descubierto muchos elementos nuevos y ahora no se esperan más adiciones *dentro* de la tabla. En el lugar 57, se encuentra no un elemento, sino un conjunto de 15 elementos, casi indiscernibles químicamente, conocidos como *tierras raras*, escritos por conveniencia en fila separada y números atómicos determinados del 57 al 71 inclusive. Muchos de estos elementos eran desconocidos en tiempos de Mendeleiev y, en verdad, perturban algo la simetría de la tabla. Análogamente, los elementos de la serie de los actínidos se pueden situar en la posición 89.

d) El extremo inferior de la tabla se ha alargado. Las filas horizontales se dividen en siete periodos, los tres primeros cortos, y los tres siguientes largos (dos series cada uno).

e) En 1894 tuvo lugar el sorprendente descubrimiento de que alrededor del 1 % de nuestra atmósfera estaba constituida por un gas, hasta entonces desconocido, al que posteriormente se le dio el nombre de *argón* (A), que había escapado a anteriores análisis por no entrar en combinación química con ningún elemento. Después fueron descubiertos otros elementos gaseosos como : helio (He), neón (Ne), argón (A), kriptón (Kr), xenón (Xe), radón (Rn); los seis forman la familia de los *gases nobles*. Toda la familia podría incorporarse a la tabla periódica añadiéndole simplemente una columna vertical, enlazada con el grupo VIII, o mejor, formando un grupo separado, con el grupo número cero, para indicar que los gases inertes tienen valencia cero. La adición inesperada de un grupo completo, fue un triunfo considerable del esquema periódico (ciertamente, un triunfo excesivo, pues la conclusión neta de que estos elementos tienen valencia cero y, por tanto, no forman compuestos químicos, hizo que los químicos, hasta muy recientemente, no buscaran compuestos de los gases nobles, algunos de los cuales, en efecto se han localizado).

f) El esquema básico de Mendeleiev se rompe por algunos lugares. Obsérvese que el argón (A) y el potasio (K) están situados, respectivamente, en los puestos 18 y 19, según exigen sus propiedades químicas, mientras que si sólo se atiende a sus pesos atómicos ($A = 39,944$ y $K = 39,096$) sus posiciones debían ser intercambiadas. Otras inversiones de este tipo se habían hecho necesarias, por ejemplo el elemento 52, (Te = 127,61) y el 53, (I = 126,9). La necesidad de algunas inversiones en la tabla periódica de los elementos habría sido para Mendeleiev no sólo una imperfección estética, sino una catástrofe real. Él esperaba confiadamente, por ejemplo, que el peso atómico del telurio (valor actual = 127,61, y el lugar 52), cuando se determinase con

mayor precisión sería inferior al del yodo (valor actual = 126,91, lugar 53). En relación a este punto, decía:

«Las leyes de la Naturaleza no admiten excepción... Es necesario que ocurra una cosa u otra: o considerar la ley periódica completamente cierta y que constituye un nuevo instrumento de investigación química, o rechazarla. Reconociendo que el método experimental es el único verdadero, he comprobado por mí mismo y he dado a todo el mundo la posibilidad de demostrar o confirmar la ley, y no pienso, como L. Meyer, cuando escribía acerca de la ley periódica, que 'sería temerario cambiar los pesos atómicos aceptados en base a un punto de partida tan incierto'. En mi opinión, las bases ofrecidas por el sistema periódico han de comprobarse o refutarse y, en cada caso, confirmarse experimentalmente.»

Claramente se ve que Mendeleiev sobreestimó la *necesidad* de la ley periódica en todos sus detalles, particularmente cuando aún no había recibido una explicación física; y, aunque las inversiones anómalas de la sucesión de elementos eran una realidad, su existencia no invalida el esquema; la complejidad de la Naturaleza es aquí mayor de lo que cualquier generalización pueda acomodar. Pero debe tenerse bien presente, que fue precisamente esta perseverancia y fe en la existencia de un esquema simple lo que llevó a Mendeleiev a sus valientes conclusiones.

La utilidad de la ley periódica no se redujo a una nueva determinación de algunos pesos atómicos y a la predicción de propiedades de nuevos elementos. Proporcionó una ordenación interna de la lista de los elementos, que reveló algunas analogías insospechadas en los mismos. El estudio completo de la química inorgánica quedó con esto revitalizado. Y quizá lo más importante de todo fue que así como el descubrimiento de Kepler de las leyes del movimiento planetario en órbitas elípticas planteaba el problema de Tántalo de cómo explicarlas por una ley física fundamental, así también ahora urgía dar una explicación de las regularidades observadas en la tabla periódica según un modelo físico para el átomo. Esta tarea, y su solución en nuestro siglo, que tanto recuerda el caso análogo de Newton, se desarrollará en la parte G. La idea del átomo del siglo pasado era incapaz de dar una visión más profunda de los procesos fundamentales de la química, pero logró sorprendentes éxitos en manos de los físicos del siglo XIX. Y ahora estamos recogiendo los frutos de esa parte de la historia de la teoría atómica.

Problemas adicionales

Problema 21.2 En la edición inglesa de 1897 del libro *Principles of Chemistry*, encontramos un resumen de Mendeleiev de sus trabajos originales acerca de la tabla periódica. Discutir cada uno de los ocho puntos tratados, tomando los datos necesarios de este capítulo:

«El resumen de este trabajo se refleja en las siguientes conclusiones: 1. Los elementos, cuando se ordenan de acuerdo a sus pesos atómicos, presentan una *periodicidad* evidente en sus propiedades. 2. Los elementos que son semejantes por sus propiedades químicas tienen pesos atómicos aproximadamente iguales (platino, iridio, osmio) o bien crecen regularmente (potasio, rubidio, cesio). 3. La disposición de elementos o grupos de elementos, en orden de sus pesos atómicos crecientes, corresponde con la que se obtiene de acuerdo a su *valencia*. 4. Los elementos que se hallan con más profusión en la Naturaleza tienen pesos atómicos *pequeños*, y están caracterizados por sus propiedades, perfectamente definidas. Son, por tanto, elementos tipo. 5. La *magnitud* del peso atómico determina el carácter de un elemento. 6. Puede esperarse el descubrimiento de muchos elementos, aún desconocidos. Por ejemplo, de elementos análogos al aluminio y al silicio, cuyos pesos atómicos estén comprendidos entre 65 y 75. 7. El peso atómico de un elemento puede corregirse, a veces, conociendo los de los elementos adyacentes. Por ejemplo, el del telurio, debe estar entre 123 y 126, y, por tanto, no puede ser 128.8. Pueden predecirse ciertas propiedades características de un elemento a partir de su peso atómico. Toda la ley de periodicidad se encuentra resumida en estas líneas.»

Problema 21.3 En el *Handbook of Chemistry and Physics* se encuentra, debajo de una de las tablas periódicas, una gráfica de los números de valencia de los elementos en función de los números atómicos. Despreciando los números de valencia *negativos*, construir una gráfica (hasta el elemento 65) de los valores de valencia *máximos* observados, en función de los *pesos* atómicos. ¿Qué periodicidad se observa? ¿Existe algún significado físico o químico de esta periodicidad? ¿Debería haber alguno?

Textos recomendados para lecturas posteriores

H. A. Boorse y L. Motz, *The World of the Atom*, New York: Basic Books, 1966. Véase en las págs. 298-312 un extracto de los escritos de Mendeleiev y una nota biográfica; o el extracto de D. L. Hurd y J. J. Kipling, *The Origins and Growth of Physical Science*, vol. 2, págs. 81-100.

Fuentes, interpretaciones y trabajos de referencia

H. Cassebaum y G. B. Kauffman, «The periodic system of the chemical elements: The search for its discoverer», *Isis*, vol. 62, págs. 314-327 (1971).

Ida Freund, *The Study of Chemical Composition*, capítulo XVI.

A. J. Ihde, *The Development of Modern Chemistry*, New York: Harper & Row, 1964, capítulo 9.

D. M. Knight (editor), *Classical Scientific Papers —Chemistry* (segunda serie), New York: American Elsevier, 1971. Contiene una colección de fuentes originales pertenecientes a la hipótesis de Prout y al reajuste de los elementos.

D. Q. Posin, *Mendeleiev: The story of a Great Scientist*, New York: McGraw-Hill Book Co., 1948.

J. W. von Spronsen, *The Periodic Systems of Chemical Elements*, New York: American Elsevier, 1969.

9
10
11
12
13

14
15
16
17

Capítulo 22

La teoría cinético-molecular de los gases

22.1 Introducción

Después de llegar al establecimiento de la teoría atómico-molecular, principalmente por los trabajos de Dalton y Avogadro, volvemos atrás, cerrando el círculo, al problema que comienza con Demócrito y Leucipo: la atomicidad de la materia física y la naturaleza del calor. En este capítulo veremos cómo unos años después de establecida la ley generalizada de la conservación de la energía y la equivalencia del calor y el trabajo (cap. 17), el modelo del gas de Bernouilli (cap. 19) había sido resucitado y transformado en una teoría poderosa de las propiedades térmicas y mecánicas de los gases, utilizando la hipótesis atómica.

Uno de los primeros científicos que señaló el camino hacia esta nueva teoría fue un viejo conocido del capítulo 17, James Prescott Joule, de Manchester, quien mostró en 1847 que una teoría cinética del calor, unida a una teoría atómica de la materia, puede explicar aceptablemente, al menos de modo cualitativo, una amplia variedad de fenómenos físicos. El trabajo matemático necesario para realizar ensayos cuantitativos de la teoría en función de datos experimentales fue rápidamente realizado por Rudolph Clausius en Alemania, James Clerk Maxwell en Inglaterra, y Ludwig Boltzmann en Austria, a partir de 1857. En 1873, J. D. van der Waals, en Holanda, demostró que la teoría cinética podía explicar, siquiera aproximadamente, no sólo las propiedades del estado gaseoso de la materia, sino también la transición entre gas y líquido; y al comienzo del siglo XX, J. Willard Gibbs, en los Estados Unidos, había desarrollado un método general de *mecánica estadística* que podía aplicarse a los tres estados de la materia. Cuando se modificaron las hipótesis de la mecánica estadística por el desarrollo de la teoría cuántica y se obtuvo un mejor conocimiento de la estructura interna del átomo (parte H), la teoría fue capaz de explicar satisfactoriamente las propiedades eléctricas y magnéticas de la

materia, así como las propiedades térmicas y mecánicas. De este modo, como una compensación al primer rechazo de la idea de Bernoulli, la física aplicó, posteriormente, esta teoría a casi todos los fenómenos concebibles.

En el capítulo 20 vimos que en los años anteriores a 1847 la teoría atómica de la química de Dalton había revalorizado la propia idea atomística desde el nivel cualitativo de la especulación; las densidades y pesos moleculares relativos de los gases eran ya conocidos con cierta precisión; Rumford y Davy habían cuestionado la teoría del calórico; la teoría ondulatoria del calor había popularizado la noción de que el calor está relacionado con las vibraciones de un medio; Mayer había estudiado la idea (en 1842 y 1845) de que tanto el calor como la energía mecánica obedecían una ley general de conservación de la energía; los experimentos laboriosos de Joule habían establecido, independientemente, el postulado inspirado de Mayer consiguiendo llegar a un valor del equivalente mecánico del calor. Sin embargo, durante casi todo este tiempo no se creyó que los átomos pudieran moverse libremente en el espacio, ni siquiera en los gases, sino que vibraban únicamente alrededor de posiciones fijas, captados en un medio compuesto de calórico o éter.

Aunque pocos científicos expresaron antes de 1847 puntos de vista favorables a la teoría de los átomos moviéndose libremente en un gas, sólo uno de ellos fue capaz de desarrollar tal teoría cinética en un desafío serio a la ortodoxia que prevalecía: John Herapath (1790-1868), científico inglés y editor de una revista de ferrocarriles. Sin tener conocimiento del trabajo de Bernoulli, Herapath propuso una teoría similar, pero mucho más desarrollada. De su modelo obtuvo la relación fundamental entre la presión (P) de un gas y la velocidad (v) de las partículas que se supone lo componen:

$$P = \frac{1}{3} \rho v^2 \quad (22.1)$$

en donde ρ es la densidad (masa/volumen) del gas. (Esta ecuación será deducida en la sección 22.4.) Como la presión y la densidad de un gas pueden determinarse directamente por la experiencia, esta ecuación puede utilizarse para calcular la velocidad que deberían tener las partículas; esto hizo Herapath y encontró un resultado muy próximo a la velocidad del sonido en el gas (aproximadamente 330 m/s en el aire).

El cálculo de Herapath de la velocidad de las moléculas del aire (publicado por vez primera en 1836) puede considerarse como un suceso importante en la historia de la ciencia, pero fue ignorado por la mayor parte de sus contemporáneos. Los primeros artículos de Herapath sobre la teoría cinética, escritos en 1820, habían sido rechazados para su publicación por la Royal Society de Londres y, a pesar de una lucha larga y amarga (incluyendo cartas al editor de *The Times* de Londres), Herapath no consiguió el reconocimiento de su teoría. Sólo Joule conocía el valor de la teoría de Herapath, pero el propio intento de Joule de establecer la teoría cinética (basada en el trabajo de Herapath y en sus nuevos experimentos) no atrajo mucha atención durante otra década.

En los años 1850-1860 resucitó, de nuevo, la teoría cinética, y esta vez se estableció rápidamente con bases firmes. Para realizar una exposición de las hipótesis básicas y algunos de los principales resultados de la teoría cinética nada mejor que citar algunos pasajes (de los cuales casi toda palabra corresponde ya a nuestras ideas actuales) del trabajo fundamental de Rudolph Clausius: el artículo «Sobre la naturaleza del movimiento que llamamos calor» (1857), que inició la fase moderna del desarrollo de la teoría. Aunque Clausius había adoptado la teoría cinética algunos años antes en relación con sus estudios termodinámicos, no publicó una exposición sistemática hasta que August Krönig, un químico alemán, anunció la hipótesis cinética, en una forma muy simple, publicada en 1856. Clausius conoció indirectamente el trabajo de Joule en 1857, pero no pudo obtener una copia del trabajo hasta un año después*. Tampoco sabía que tanto Krönig como Joule habían sido anticipados por Bernoulli y Herapath.

«Krönig supone que las moléculas de un gas no oscilan alrededor de posiciones de equilibrio definidas, sino que se mueven con velocidad constante en líneas rectas hasta que chocan con otras moléculas o con alguna superficie que resulta impermeable. Yo comparto completamente este punto de vista y opino que este movimiento es la causa de la fuerza expansiva del gas. Por otra parte, considero que éste no es el único movimiento presente.

»En primer lugar, la hipótesis de un movimiento rotatorio y progresivo de las moléculas se sugiere por sí mismo en seguida, ya que en cada impacto de dos cuerpos, a menos que el choque sea central y rectilíneo, surge un movimiento de rotación y otro de traslación.

»También soy de la opinión de que la vibración tiene lugar dentro de las diversas masas en un estado de movimiento progresivo. Tales vibraciones se conciben de distintas formas. Incluso si nos limitamos únicamente a la consideración de las masas atómicas y consideramos éstas absolutamente rígidas, es posible, sin embargo, que una molécula, formada de varios átomos, no constituya tampoco una masa absolutamente rígida, sino que en su interior los átomos se muevan con cierta extensión y sean capaces de oscilar unos respecto a los otros.»

Aunque Clausius no podía proporcionar un cálculo teórico directo de la cantidad de energía contenida en estas vibraciones y rotaciones moleculares, decía que el equilibrio debe establecerse como resultado de las colisiones entre las moléculas, de modo que llegará a encontrarse una proporción fija de la energía total en la rotación y en la vibración y el resto en el movimiento de traslación de las moléculas.

De acuerdo con la teoría cinética, mantenía que: «la presión de un gas contra una superficie fija viene producida por el choque y el rebote de las moléculas en gran

* Joule había publicado su artículo en las *Memorias de Sociedad Literaria y Filosófica de Manchester*; parece un lugar extraño para las contribuciones importantes de las ciencias físicas, pero, en realidad, muchos de los trabajos de John Dalton habían aparecido en la misma revista cuatro décadas antes.



Fig. 22.1 Rudolf Clausius (1822-1888). Cortesía del Deutsche Museum, München.

número», y esta presión es, a volumen constante, proporcional a la energía cinética del movimiento de traslación de las moléculas (Ec. 22.1).

«Por otra parte, sabemos por la ley de Gay-Lussac, que a volumen constante, la presión de un gas perfecto crece en igual proporción que la temperatura calculada a partir de -273°C , a la cual llamamos temperatura absoluta. Por tanto, de acuerdo con lo dicho anteriormente, resulta que la temperatura absoluta es propor-

cional a la energía cinética* del movimiento de traslación de las moléculas. Pero como, según una observación anterior, los diversos movimientos en un mismo gas guardan una relación mutua constante es evidente que la energía cinética del movimiento de traslación constituye una proporción constante de la energía total, con lo que la temperatura absoluta es también proporcional a la energía cinética total del gas.»

Según este modelo, resulta que (como Clausius había ya sugerido en su primer artículo) el calor específico de un gas debe ser independiente de la temperatura y que los dos calores específicos (a volumen constante y a presión constante) difieren en un término constante. Ambas consecuencias se corresponden, en efecto, con las propiedades de los gases reales en un amplio intervalo de temperaturas.

Aunque Clausius realizó cálculos detallados sólo para un modelo correspondiente al estado gaseoso de la materia —en el cual se presume que las moléculas se mueven libremente en un espacio casi vacío con sólo choques ocasionales—, estaba dispuesto a proponer una explicación plausible de la diferencia entre estados gaseoso, líquido y sólido, basada en un punto de vista cinético-molecular cualitativo. En el estado *sólido* sugería que las moléculas vibran alrededor de posiciones fijas de equilibrio y giran alrededor de sus centros de gravedad. En el estado *líquido* las moléculas no poseen posiciones definidas de equilibrio, sino que pueden desplazarse de un lugar a otro, aunque siempre influidas por las fuerzas que ejercen las moléculas próximas. En cambio, en el estado *gaseoso* las moléculas escapan, finalmente, de la influencia de sus vecinas y vuelan en línea recta; si dos moléculas chocan, rebotan simplemente de acuerdo con las leyes de las colisiones elásticas.

Siguiendo este esquema cualitativo, Clausius desarrolló una explicación de los cambios de estado. Así, la *evaporación* de un líquido podía explicarse suponiendo que, aunque la velocidad media de una molécula puede no ser suficiente para llevarla fuera del alcance de las fuerzas atractivas de sus vecinas, unas pocas moléculas, excepcionalmente rápidas, pueden ser capaces de escapar de una superficie líquida, incluso a temperaturas por debajo del punto de ebullición. Inherente a esta explicación, es la noción de que, incluso a una sola temperatura, las moléculas tienen un intervalo de velocidades distintas; esta idea fue pronto desarrollada con gran eficacia por Maxwell (véase sec. 22.6).

Este resumen es sólo una muestra de la riqueza de conclusiones y la generalidad de aplicaciones de la teoría cinético-molecular que a través del trabajo de hombres como Maxwell, Boltzmann, Van der Waals y Gibbs, llegó a ser, finalmente, el principal triunfo de las ciencias físicas del siglo XIX. Para nuestros propósitos dejaremos el camino estrictamente histórico y resumiremos en el lenguaje moderno algunas consecuencias cualitativas antes de volver a la idea cuantitativa del concepto de que el calor es un modo de movimiento de la partículas submicroscópicas.

* Hemos reemplazado el término *vis viva*, todavía en uso en 1857, por su equivalente moderno (excepto en un factor $\frac{1}{2}$) de energía cinética.

22.2 Algunos éxitos cualitativos de la teoría cinético-molecular

a) Todo trabajo realizado sobre una sustancia (p. ej., por rozamiento) puede convertirse en energía cinética de movimiento o en energía potencial entre los átomos o moléculas. En los gases, el aumento de energía cinética de las partículas significa un mayor movimiento térmico aleatorio; en los sólidos, la energía puede almacenarse en forma de una mayor vibración de los átomos, los cuales están muy apretados; y en un líquido tanto el movimiento térmico como la vibración térmica desempeñan sus papeles. La conducción del calor de un cuerpo caliente a otro frío se considera, pues, que es una cesión de energía de movimiento de un sistema de moléculas al otro a través de la superficie de contacto. La dilatación de un sólido o líquido por calentamiento será, por tanto, la consecuencia de una mayor agitación de las moléculas individuales y de su consiguiente mayor separación como resultado de choques mutuos más violentos. Por tanto, si se introduce un termómetro de mercurio en un recipiente que contenga un gas y efectuamos un trabajo sobre éste (por compresión o rozamiento), el termómetro señalará una mayor temperatura en la escala porque (i) el trabajo efectuado sobre el gas incrementa la energía cinética de sus moléculas, lo cual a su vez significa (ii) choques más frecuentes e intensos de estas moléculas con el bulbo de vidrio que contiene el mercurio, (iii) cesión de parte de esta energía al mercurio y (iv) por último, una dilatación de la columna de mercurio puesto que la mayor agitación de las moléculas de éste resulta en una mayor separación entre ellas.

b) Nuestras propias sensaciones de frío y de calor por el tacto no se explican tan simplemente por esta u otra teoría física, pero, evidentemente, no podemos sentir ni ver directamente la agitación individual de las moléculas, pues sus dimensiones son un millar de veces inferiores a la longitud de onda de la luz o a los receptores sensibles de nuestra piel. Sin embargo, si consideramos una pequeña partícula de polvo o bacteria suspendida en el aire tranquilo o en la superficie de un líquido y bombardeada por todas partes por enjambres de moléculas invisibles, pero altamente agitadas del gas o líquido de los alrededores, se comprende por qué, examinada con un aumento de alta potencia, aparece danzando en movimiento irregular perpetuo, como si estuviera viva.

En efecto, cuando este fenómeno se observó por vez primera en suspensiones de partículas orgánicas en el siglo XVIII, se sospechó que se trataba de una evidencia de *vitalidad*; pero en 1827 el botánico inglés Robert Brown demostró que movimientos semejantes podían verse en suspensiones de casi todo tipo de partícula de un determinado tamaño, orgánica o inorgánica. Esto es lo que se denominó «movimiento browniano», y fue atribuido al impacto de las moléculas invisibles sobre las partículas, aunque el desarrollo de una teoría cuantitativa satisfactoria tuvo que esperar al trabajo de Einstein de 1905. (Véase fig. 22.2.)

c) El resumen del artículo de Clausius mencionaba otro éxito cualitativo de la teoría cinético-molecular: una explicación de la diferencia entre los tres estados —sólido, líquido y gas—.

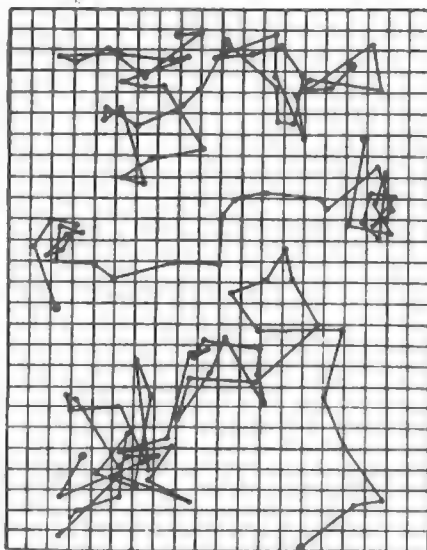


Fig. 22.2 Movimiento browniano. Posiciones de tres granos de polen en el agua, vistos con un microscopio a intervalos de 30 segundos. (Según J. Perrin.)

lido, líquido y gaseoso— en función de la agitación relativa de las moléculas. (Especialmente, la misma explicación había sido dada anteriormente por Davy y Joule.) Las mismas ideas fundamentales sirven para explicar también otros fenómenos simples, por ejemplo: (i) la difusión de un gas en otro, debido a la agitación térmica de las moléculas de uno de ellos que las lleva al espacio ocupado por las del otro; (ii) la expansión inmediata de un gas para llenar totalmente el recipiente que lo contiene, sea cual fuere su tamaño, debido a la pequeñez de las fuerzas atractivas entre sus moléculas y las velocidades de su movimiento al azar, muy elevadas; (iii) la presión de un gas sobre las paredes de la vasija que lo contiene, debida a los billones de colisiones por segundo de las moléculas gaseosas contra las paredes del recinto que lo contiene.

22.3 Modelo de un gas e hipótesis de la teoría cinética

Volviendo ahora a los logros cuantitativos de la teoría cinético-molecular (y olvidando al adjetivo «molecular» de la frase, de conformidad con la costumbre), nos concentraremos, principalmente, en sus aplicaciones a los *gases*, por ser más ilustrativo, matemáticamente más simple y físicamente más desarrollado en el momento presente. Seguiremos una deducción simple en la cual nuestro problema se

reduce a lo siguiente: Construir un *modelo* aceptable *para los gases* que resulte de una consecuencia lógica (y así «expliqué») las leyes conocidas del comportamiento de los *gases* y, si es posible, nos lleve a buscar nuevos efectos comprobables. El modelo y las hipótesis subyacentes que llevan al modelo forman la *teoría* que es útil en tanto explica previamente leyes conocidas y engendra nuevos resultados.

Algunas de las hipótesis que sirvan de base a la construcción del modelo han de estar plenamente comprobadas, mientras que otras pueden ser simplemente aceptables o aun audazmente nuevas y que se justifiquen *a posteriori* por los resultados a que conducen. Resumiendo los diez hechos principales o hipótesis sobre las que construimos nuestro modelo inicial, diremos:

a) *La ley general de los gases*. Los hechos experimentales referentes a una muestra determinada de un gas estable y relativamente enrarecido vienen, como sabemos, bien especificados por la ecuación $PV/T = r^*$.

b) *Hipótesis molecular*. Una de las hipótesis fundamentales de nuestra imagen del gas es, naturalmente, la idea de que los gases están constituidos por partículas pequeñas submicroscópicas (átomos o grupos de átomos llamados moléculas). La mejor evidencia experimental fue, inicialmente, química (el éxito de la teoría atómica de Dalton, particularmente al tratar con las leyes de las proporciones que se combinan). Para nuestro propósito, discutiremos primero sólo los gases puros simples formados por subestructuras idénticas (un tipo de molécula o un tipo de átomo).

c) *La ecuación de estado*. Otro concepto apoyado experimentalmente que debe incluirse en nuestro modelo desde el principio o considerarse como una de sus consecuencias es la hipótesis de Avogadro, la cual, enunciada simplemente, requiere que todos los gases a una determinada presión, volumen y temperatura posean el mismo número de moléculas. Una vez definido el número de Avogadro N como el número de moléculas por mol de sustancia ($6,02 \times 10^{23}$ moléculas por mol), podemos reformular la ley general

$$\frac{PV}{T} = r \quad (22.2)$$

que presenta el inconveniente de que el valor de r ha de determinarse experimentalmente para cada muestra particular de cada gas (r cambia con la masa y con la

* En condiciones extremas de presión y temperatura esta ecuación simple deja de ser suficientemente precisa, pero puede reemplazarse por una mejor aproximación que se justifica muy bien teóricamente. Los gases ideales o perfectos, por definición, son aquellos que se comportan exactamente de acuerdo con la ecuación $PV/T = \text{constante}$, la cual, afortunadamente, se puede aplicar a la mayor parte de los gases reales lejos de tales condiciones extremas.

naturaleza química del gas). Específicamente, los experimentos realizados con muestras del mismo gas, pero con masas totales diferentes m , nos dicen que

$$\frac{PV}{T} \propto m.$$

Además, eligiendo muestras gaseosas de igual masa, pero diferente constitución química (es decir, distinto peso molecular M), resulta

$$\frac{PV}{T} \propto \frac{1}{M}.$$

No existiendo otros fenómenos que tener en cuenta, podemos escribir

$$\frac{PV}{T} \propto \frac{m}{M} \quad \text{o} \quad \frac{PV}{T} = \frac{m}{M} \times (\text{una constante } R), \quad (22.3)$$

en donde R es, ciertamente, un factor igual para cada muestra de cualquier gas y, por ello, se llama *constante universal* de los gases. Obsérvese que m/M , cociente de la masa de la muestra por su peso molecular, es el número de moles n de la muestra. Por tanto,

$$PV = nRT. \quad (22.4)$$

Esta importantísima ecuación, que resume esencialmente los hechos observados experimentalmente, es la llamada *ecuación de estado de los gases* (perfectos o ideales). Como R es una *constante universal*, la ecuación $R = PV/nT$ nos dará un valor numérico para R si conocemos cualquier conjunto de valores de P , V , n y T . Para $T = 273 \text{ K}$ y $P = 1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ todos los gases, según la hipótesis de Avogadro, tienen el mismo volumen por mol ($V/n = 2,24 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{mol}$). Por tanto, $R = 8,31 \text{ (joules/mol)/kelvin}$ (comprobar el valor numérico y las unidades).

La nueva forma de la ley de los gases tiene enormes ventajas prácticas sobre la Ec. (22.2). Ahora podemos predecir el comportamiento físico de una cierta cantidad de gas a partir sólo de su composición química y su masa! Esto resulta evidente en el siguiente ejemplo, que no hubiera podido ser resuelto directamente antes de formular la Ec. 22.4.

Ejemplo 1. ¿Qué presión ejercerán 10 g de helio contenidos en un cilindro de 500 cm^3 a la temperatura ambiente (21°C)?

Solución: El peso molecular relativo del He es, aproximadamente, 4 (véase tabla 21.1). Un mol será 4 g y x g corresponden a $x/4$ moles. Por tanto, $n = 10/4 = 2,5$ moles.

$$P = \frac{nRT}{V} = \frac{[2,5 \text{ moles}] [8,31 \text{ (joules/mol)/kelvin}] \times [294\text{K}]}{500 \text{ cm}^3} = 1,22 \times 10^5 \text{ N/m}^2,$$

lo cual es superior a 1000 atm (y, por tanto, demasiada presión, probablemente, para este recipiente).

Problema 22.1 Un cilindro de 50 cm^3 resiste bien hasta 100 atm. Determinar la temperatura a la cual 3 g de gas oxígeno en el cilindro le harían estallar, b) Determinar el número de moléculas de oxígeno existentes en una vasija de 10 cm^3 a 20°C que producen una presión de 50 atm.

Repitiendo: $PV = nRT$ es una ecuación de los gases ideales comprobada experimentalmente y, por tanto, debe aparecer axiomáticamente en nuestro modelo de gas o debe deducirse como una consecuencia del mismo.

d) *Tamaño de las moléculas.* El modelo de gas que estamos analizando debe incluir la condición de que las moléculas individuales son extraordinariamente pequeñas, quizás del orden de 10^{-10} a 10^{-9} m. Las evidencias experimentales de este punto son numerosas, variadas y conclusivas. Por ejemplo, los vapores y gases ocupan volúmenes que pueden ser miles de veces superiores que los líquidos de donde proceden y, al revés, los gases pueden comprimirse hasta fracciones muy pequeñas de su volumen original. Se difunden a través de poros pequeños invisibles en porcelana no vítrea. Se combinan de acuerdo con las leyes de las proporciones químicas, incluso en cantidades extraordinariamente diminutas. Aun las moléculas mayores y más complicadas, como la de algunos aceites (por ejemplo, oleato de glicerina $\text{C}_{57}\text{H}_{104}\text{O}_6$), no tienen diámetros superiores a 10^{-9} m, pues éste es el espesor medido aproximado de las películas de aceite sobre el agua.

Por tanto, llegamos a la conclusión de que, ordinariamente, podemos despreciar el volumen real de todas las moléculas en comparación con el volumen total que el gas ocupa en virtud de su movimiento incesante y, ciertamente, podemos considerarlas en principio como masas puntuales o, en todo caso, como esferas lisas muy pequeñas.

e) *Número de moléculas.* Por la misma evidencia que en d) debemos suponer que hay enjambres enormes de moléculas en cada centímetro cúbico de un gas ordinario; de hecho, el número de Avogadro expresa, cuantitativamente, este punto. Incluso en el mejor vacío que comunmente se obtiene en el laboratorio (aproximadamente 10^{-10} atm) existen, a temperaturas ordinarias, alrededor de 10^9 moléculas/ cm^3 .

f) *Recorrido libre medio.* Con la enorme expansión de un gas obtenido de un líquido que hemos indicado anteriormente, las distancias medias entre moléculas resultan, naturalmente, grandes en comparación con su propio tamaño. Por término medio una molécula debe viajar distancias cientos y miles de veces superiores a sus propias dimensiones antes de chocar con otra molécula. Estas distancias me-

didadas indirectamente son del orden de 10^{-7} m para las densidades ordinarias y reciben el nombre de *recorrido libre medio*.

g) *Fuerzas intermoleculares*. Aunque la separación media entre las moléculas es muy grande en dimensiones atómicas, su valor absoluto es tan pequeño que podemos imaginar que las fuerzas mutuas entre ellas deben ser importantes (en los estados sólido y líquido deben ser intensas en virtud de su gran calor latente).

En primer lugar, podemos sospechar que existan fuerzas gravitatorias convencionales, pero son triviales como muestra un cálculo rápido. Por ejemplo, las masas de las moléculas de oxígeno pueden calcularse a partir del postulado de Avogadro. Como 32 kg de O_2 contienen más de 6×10^{26} moléculas, cada una de éstas pesará $32/(6 \times 10^{26})$, o sea, aproximadamente, 5×10^{-26} kg. Dos de estas moléculas separadas 10^{-7} m ejercerán una fuerza mutua gravitatoria de

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

o sea

$$F = (6,67 \times 10^{-11}) \times \frac{(5 \times 10^{-26})^2}{(10^{-7})^2} \text{ newtons,}$$

o sea, 2×10^{-47} newton, cantidad totalmente despreciable. (Lo mismo puede decirse del peso de cada molécula para todos nuestros objetivos.)

Pero entre estas partículas pueden existir fuerzas distintas de las gravitatorias —tal vez fuerzas eléctricas. Aun cuando no es fácil imaginar exactamente qué fuerzas son o cuan intensas son, podemos realizar un experimento para ver si existen o no. Si existen, un gas a presión que se deje dilatar hacia un gran recipiente *vacío*, al separarse sus moléculas harán que trabajen las fuerzas intermoleculares. Si las fuerzas son atractivas, las moléculas realizarán un trabajo al separarse y como, según las hipótesis fundamentales, la energía necesaria para este proceso sólo puede provenir de la energía calorífica, el gas debería enfriarse al dilatarse hacia un vacío. Inversamente, si las fuerzas intermoleculares fuesen repulsivas, la masa del gas debería calentarse en la dilatación. Sin embargo, el hecho experimental observado por Gay Lussac (véase sec. 17.8) es que, al expandirse un gas en el vacío, sólo se produce un pequeño enfriamiento o calentamiento en toda la masa de los gases reales*; esto indicaba que no existían fuerzas intermoleculares significativas, excepto en el momento de las colisiones que, presumiblemente, tienen lugar en tiempos muy cortos y representan un intervalo de tiempo despreciable frente a la historia completa de cada molécula. Incidentalmente, debemos recordar que éste es exactamen-

* Para un relato del experimento de Joule sobre este punto véase Magie, *Source Book in Physics*, págs. 172-174.

te el experimento que refuta, de un modo más directo, el viejo modelo *estático* de las moléculas gaseosas que se repelen mutuamente.

Vamos a hacer ahora una pequeña digresión: Aun cuando fuese cierto que las moléculas no ejercen fuerzas importantes y estén muy separadas en la fase gaseosa, podemos esperar que cuando estén próximas, como sucede en los líquidos y los sólidos, dichas fuerzas intermoleculares sean importantes. Debemos postular que pequeños incrementos de las separaciones intermoleculares ponen en juego cierta *atracción* mutua en el caso de líquidos y sólidos, ya que de no ser así no podríamos explicar la *cohesión*, que es la resistencia que se opone a los esfuerzos que tienden a dividir los materiales sólidos o líquidos. También debe existir el efecto contrario: la *repulsión* mutua al disminuir las distancias intermoleculares, pues de no ser así no podríamos explicar la gran resistencia que ofrecen los líquidos y los sólidos a las compresiones más pequeñas. Podemos reunir toda esta información acerca de las fuerzas intermoleculares en una gráfica cualitativa que represente la distancia en función de la fuerza (donde las fuerzas *positivas* representan repulsión entre moléculas y las *negativas* atracción, véase fig. 22.3).

Problema 22.2 Justificar la posición indicada en la fig. 22.3 para las distancias intermoleculares en sólidos y gases.

h) *Agitación térmica*. Fuertemente involucrado en el modelo desarrollado, en las hipótesis fundamentales de la teoría cinética y en las observaciones del movimiento browniano y la difusión, está el requisito de movimiento *rápido* de las mo-

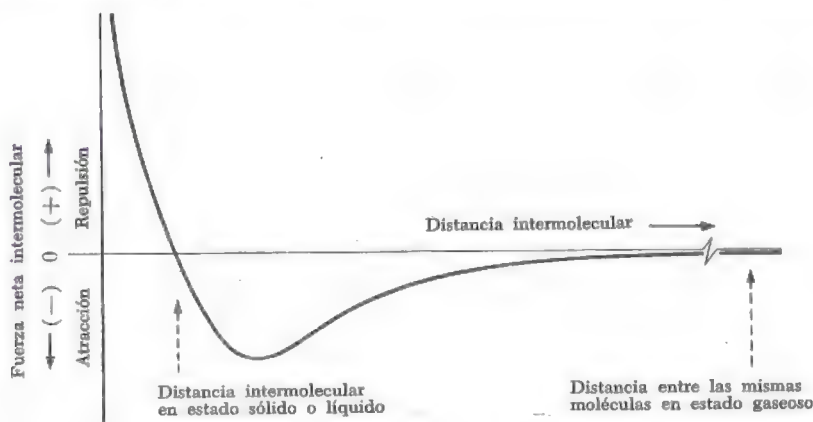


Fig. 22.3 Gráfica cualitativa de la fuerza ejercida entre dos moléculas en función de la distancia intermolecular.

lículas gaseosas a temperaturas usuales y elevadas. La imagen del gas se amplía con el concepto de partículas móviles que recorren trayectorias rectilíneas relativamente «largas» y chocan brevemente muchos millones de veces por segundo con otras moléculas o con las paredes del recipiente (donde cada choque contribuye al mantenimiento de la presión). Tan breves son estos choques mutuos, tan aleatorios sus movimientos, que en nuestro análisis despreciamos el efecto de tales choques. También veremos que la agitación térmica, como indicaba el movimiento browniano, está siempre presente. Todos los átomos (por encima de 0 K) exhiben dicha agitación, no sólo en gases y líquidos, sino también en sólidos, donde aparece como una vibración a pequeña escala entre los átomos próximos.

i) *Naturaleza de las colisiones; aplicación de las leyes de Newton.* Una vez admitido que las moléculas experimentan choques, debemos considerar las leyes mecánicas que gobiernan estos sucesos. Podríamos preguntar si no es peligroso considerar que las leyes de la mecánica de Newton, formuladas a partir de la experiencia con objetos relativamente grandes, se mantienen también en el dominio microscópico. Esta es una precaución razonable, pero, al menos, al comienzo de nuestro trabajo en que no disponemos de más leyes que las de Newton, debemos utilizarlas. Mas debemos estar atentos para rechazar esta extrapolación cuando los hechos revelados por la experiencia lo exijan. James Clerk Maxwell discute la relación entre el modelo atomístico y las fuerzas de interacción del modo siguiente*:

«En lugar de decir que las partículas son esferas compactas y elásticas, podemos (si nos place) decir que ellas son centros de fuerzas, cuya acción es insensible, excepto a distancias muy pequeñas, en que repentinamente aparece en forma de una fuerza repulsiva de gran intensidad. Es evidente que ambas hipótesis conducen a los mismos resultados.»

j) *Conservación de la energía cinética.* Debemos también suponer que las colisiones moleculares entre sí y con el recinto son perfectamente elásticas, es decir, en valor medio la energía cinética (E_c) de una molécula antes del choque es la misma que inmediatamente después; sólo *durante* el choque la E_c se convierte en energía potencial de distorsión elástica, presumiblemente como en el caso de una pelota elástica que rebota sobre una pared.

Las razones de esta hipótesis simplificativa son evidentes: Si las colisiones no fueran elásticas, al cabo de cierto tiempo la E_c de cada molécula desaparecería, incluso en el caso de que se tratara de un gas que llenara un recinto totalmente aislado; al disminuir la E_c total, se reduciría la presión y las velocidades llegarían a ser tan pequeñas que las débiles fuerzas gravitatorias y otras fuerzas atractivas darían lugar a la licuación o solidificación del gas.

* *Philosophical Magazine*, vol. 19, págs. 19-32 (1860).

Pero esto no se ha observado nunca. Ni podemos, en este momento, imaginar fácilmente lo que ocurriría con la E_c perdida en un choque inelástico hipotético de una molécula. Naturalmente, parte de la energía podía ser —y a veces lo es— almacenada en forma de energía potencial como en un cambio de posición o en un incremento de la vibración de unas partes de la molécula respecto a otras o, incluso, en la rotación de la molécula. Sin embargo, ésta no es un recinto ilimitado de energía y, en cualquier caso, debemos comprobar la hipótesis más simple del comportamiento perfectamente elástico*. La sugerencia previamente mencionada de que las moléculas deben considerarse pequeñas, lisas y esféricas es simplemente una expresión de este requisito de conservación de la energía cinética.

22.4 Deducción de la fórmula de la presión

Tenemos ahora una bella imagen mental o *modelo* de un gas ideal típico. Resulta abrumadoramente tentador considerarlo en función de un conjunto tridimensional de bolas de billar microscópicas agitadas. Debemos estar dispuestos a una quiebra de la analogía cuando se lleve más allá de la evidencia y realizar nuevas hipótesis si son necesarias frente a las consecuencias imprevistas del modelo, pues el comportamiento real de un conjunto de bolas de billar es difícil de imaginar.

Como ensayo inicial de la validez de nuestro modelo, elegiremos ahora cualquier ley *cuantitativa* bien establecida de los gases y trataremos de deducirla a partir del modelo. Siguiendo la costumbre, elegiremos la ley general de los gases [en su forma moderna, Ec. (22.4), $PV = nRT$]. Si deducimos esta ley, quedaremos completamente satisfechos. Realmente, no lo podemos hacer de un modo directo, y en su lugar obtendremos de nuestro análisis otra ecuación de la forma $PV = XYZ$ (en donde XYZ representará algunos factores tales como la masa y velocidad de las moléculas). La prueba de que nuestro modelo es válido, dependerá entonces de demostrar que $XYZ = nRT$ o de que la ecuación $PV = XYZ$ realmente lleva a consecuencias comprobables experimentalmente. Así lo haremos con resultados secundarios impresionantes.

Para deducir una relación entre la presión, el volumen y otras variables de un gas consideremos un recipiente cúbico rígido de aristas de longitud l^{**} que encierra

* Por otra parte, ningún cuerpo macroscópico, ni siquiera una esfera del mejor acero, muestra colisiones perfectamente elásticas; siempre hay pérdidas de energía mecánica por rozamiento interno y, por tanto, un incremento de temperatura por incremento de la agitación molecular interna. Pero, ¿cuál sería el significado de las pérdidas de calor por rozamiento en el choque molecular? Obsérvese que aquí tenemos un buen ejemplo de la quiebra de un concepto obtenido de la experiencia a gran escala cuando se aplica a la realidad del mundo submicroscópico.

** Si esta primera hipótesis simplificadora parece demasiado restrictiva, pensemos que cualquier recipiente no cúbico puede considerarse como una serie de múltiples subespacios cúbicos muy pequeños.

las moléculas de un gas ideal puro (fig. 22.4). Cada molécula posee la misma masa m_0 y se mueve rápidamente en uno y otro sentido en la caja, chocando, frecuentemente, en sus seis paredes de acuerdo con el modelo gaseoso que hemos aceptado.

a) En primer lugar imaginemos que se trata de una sola molécula encerrada en la caja. Por simplicidad supongamos que su velocidad v (y, por tanto, la energía cinética) no cambia numéricamente, excepto en las colisiones reales, las cuales duran un tiempo despreciablemente corto. Cada vez que la molécula choca contra una superficie plana y rígida de la caja, por ejemplo A (sombreada en la fig. 22.4), se refleja de nuevo con igual celeridad; evidentemente, la componente de la velocidad perpendicular a la cara A se invierte simplemente y las otras componentes no vienen afectadas, en absoluto, por el choque.

Esta situación nos recuerda el resultado del ejemplo 2, sección 17.1. Si un objeto muy ligero experimenta un choque elástico sobre un objeto muy masivo, simplemente rebota con la misma celeridad en sentido opuesto. Con mayor generalidad, si la superficie del objeto masivo es paralela al plano zy y el objeto ligero choca (por ejemplo, en A) oblicuamente con una velocidad vectorial \mathbf{v} de componentes v_x, v_y, v_z , entonces la componente v_x se invertirá en el choque, mientras que v_y y v_z permanecerán invariables. En este caso el objeto muy ligero es una molécula y el objeto masivo es una pared del recinto cúbico. Es importante observar que la energía cinética de la molécula se conserva en estas colisiones siempre que la pared permanezca fija y la celeridad de la molécula no cambie. Por otra parte, existe una transferencia continua de cantidad de movimiento entre las moléculas y la pared que experimenta el choque y vamos a calcularla para una pared. (Sin embargo, en una caja rígida tomada en un conjunto, las acciones sobre las distintas paredes se anulan en valor medio, cuando la molécula va errando por el interior de la caja.)

b) Si v_x es la componente de velocidad de la molécula en la dirección x y t el tiempo que la molécula necesita para recorrer los l cm desde la cara B (opuesta a A) hasta la cara A , resulta

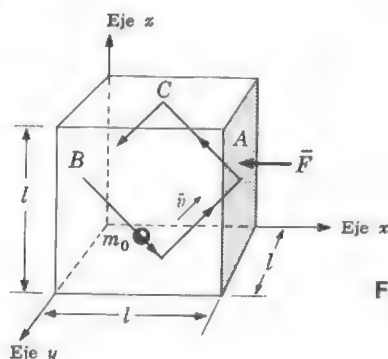


Figura 22.4

$$v_x = \frac{l}{t} \quad \text{y} \quad t = \frac{l}{v_x}.$$

Por tanto, el intervalo de tiempo τ necesario para completar el recorrido desde su choque en A hasta el siguiente choque otra vez en A , es $2t$. Por consiguiente,

Tiempo transcurrido por choque (en la cara A , para una molécula) $\equiv \tau = 2l/v_x$.

Si τ es el número de segundos por choque, la magnitud recíproca $1/\tau$ es el *número de choques por segundo*, dado por $1/\tau = v_x/2l$.

c) Durante cada una de las $v_x/2l$ colisiones que ocurren cada segundo entre la molécula de masa m_0 y la cara rígida A , la componente de la velocidad v_x cambia de positiva (a la derecha en la fig. 22.4) a negativa (a la izquierda) con una variación total $2v_x$. La variación de *cantidad de movimiento* de la molécula (incremento del producto masa por velocidad) es igual a $2m_0v_x$ en *cada colisión*; durante *un segundo* la suma de todas las variaciones de cantidad de movimiento es

$$(2m_0v_x) \times \left(\frac{v_x}{2l}\right),$$

es decir, (variación de cantidad de movimiento/colisión) \times (colisiones/s). Naturalmente,

$$(2m_0v_x) \times \left(\frac{v_x}{2l}\right) = \left(\frac{m_0v_x^2}{l}\right),$$

y esto se aplica para una sola molécula.

Consideremos ahora lo que ocurre al número real N_m de moléculas en la caja. Su variación total de cantidad de movimiento por segundo en la cara A es

$$N_m \left(\frac{m_0v_x^2}{l}\right),$$

si todas poseen, ordinariamente, la misma velocidad. Si no ocurre así (y sería demasiada limitación imponer una restricción tan improbable), sólo tenemos que escribir v_x^2 en lugar de v_x^2 en la última expresión, en donde v_x^2 significa el valor *medio* de la suma de los cuadrados de las componentes x de la velocidad para las N_m moléculas presentes, es decir,

$$\overline{v_x^2} \equiv \frac{[(v_x)_1^2 + (v_x)_2^2 + (v_x)_3^2 + \cdots + (v_x)_{N_m}^2]}{N_m} \quad (22.5)$$

Esto no presupone nada respecto a la forma en que los valores reales de v_x se distribuyen entre las N_m moléculas, cuestión que investigaremos más tarde.

Así pues, podemos escribir: La variación total de cantidad de movimiento por segundo de las N_m moléculas en la cara A es igual a

$$\frac{N_m m_0 \overline{v_x^2}}{l}.$$

(Observar cómo crece y cómo cambia de significado esta expresión en el desarrollo).

d) Según la segunda ley de Newton, la variación de cantidad de movimiento = *fuerza neta media* \bar{F} ejercida, multiplicada por el *tiempo* durante el cual tiene lugar la variación de cantidad de movimiento. En consecuencia, la variación de cantidad de movimiento *por segundo* experimentada por las moléculas viene dada numéricamente por \bar{F} ; de otro modo, la fuerza media ejercida sobre las moléculas por la cara A , al rebotar aquellas viene dada numéricamente por

$$\bar{F} = \frac{N_m m_0 \overline{v_x^2}}{l}. \quad (22.6)$$

Como los choques de las moléculas contra la pared son muy numerosos, esta fuerza es la que se observaría si la pared o cara A fuera un émbolo mantenido en su lugar por medio de un dinamómetro que equilibrara los choques moleculares. Según la ley de acción y reacción, esto es numéricamente igual a la fuerza media (perpendicular) con que las moléculas actúan sobre la cara A .

e) Realmente, no nos interesa la fuerza ejercida sobre la pared, sino la *presión*. Recordemos que presión P = fuerza perpendicular/área. Si dividimos los dos miembros de la Ec. (22.5) por l^2 , que es el área de la cara A (y es igualmente el área de cada una de las otras cinco caras), tenemos

$$\frac{\bar{F}}{l^2} (\equiv \text{sobre la cara } A) = \frac{N_m m_0 \overline{v_x^2}}{l^3}.$$

Como l^3 es el volumen V del recinto cúbico, resulta

$$P = \frac{N_m m_0 \overline{v_x^2}}{V} \quad \text{o} \quad PV = N_m m_0 \overline{v_x^2}. \quad (22.7)$$

Éste es un desarrollo muy importante en nuestro esfuerzo por deducir la relación entre P , V , y otras magnitudes susceptibles de medida; sólo nos resta probar que el segundo miembro de la Ec. 22.7 es equivalente a nRT . Pero ésta no es la parte más fácil de nuestro trabajo.

f) Ante todo, la expresión $\overline{v_x^2}$ de la Ec. 22.7 puede reemplazarse por $v^2/3$; el argumento es bastante simple. Según la Ec. 22.7,

$$\overline{v_x^2} = \frac{PV}{N_m m_0},$$

en donde P es la presión ejercida sobre la cara A , y V , N_m y m_0 son constantes para esta caja y esta muestra de gas. Si enfocamos nuestra atención en una de las otras caras, por ejemplo la cara superior C perpendicular al eje z , obtendríamos

$$\overline{v_z^2} = \frac{PV}{N_m m_0}.$$

La presión P en C no es distinta a la de A o a la de cualquier otra cara, y V , N_m y m_0 son, sin embargo, las mismas en cada caso; por tanto,

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2},$$

es decir, admitimos que no existe *preferencia* alguna entre las moléculas por desplazarse a lo largo de cualquiera de los tres ejes. Por el teorema de Pitágoras, extendido al vector v en tres dimensiones $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$ y, por tanto, $\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}$ o sea, en nuestro caso $\overline{v^2} = 3\overline{v_x^2} = 3\overline{v_y^2} = 3\overline{v_z^2}$. En consecuencia, a $\overline{v_x^2} = \frac{1}{3} \cdot \overline{v^2}$ y la Ec. (22.7) toma la forma

$$PV = \frac{1}{3} N_m m_0 \overline{v^2}. \quad (22.8)$$

[Esta ecuación es claramente equivalente a (22.1), ya que $\rho = N_m m_0 / V$.]

Obsérvese que $\frac{1}{2} m_0 \overline{v^2}$ es la energía cinética media de traslación ($E_{c_{\text{tras}}}$) por molécula y $N_m (\frac{1}{2} m_0 \overline{v^2})$ es la $E_{c_{\text{tras}}}$ total para todas las moléculas N_m de la muestra de gas en la caja. Por tanto, conviene escribir, de nuevo, la Ec. 22.8 en la forma

$$PV = \frac{2}{3} N_m \frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \frac{2}{3} (E_{c_{\text{tras}} \text{ total del gas}}). \quad (22.9)$$

que significa que el producto de la presión por el volumen de un gas es igual a dos tercios de la energía cinética total de traslación de las moléculas.

Ésta es una consecuencia sorprendente de nuestro modelo. En forma cualitativa suponíamos que la presión del gas contra el recinto era debido a los choques incessantes de moléculas de gas altamente agitadas, pero no teníamos idea de la existencia de una relación tan simple y perfecta entre la presión y la energía de las moléculas gaseosas. La ecuación (22.9) se denomina ecuación de la presión para un gas ideal. Es una pena no haber obtenido el resultado $PV = nRT$ en nuestros cálculos; pero tenemos la relación buscada $PV = XYZ$, y la validez de nuestro modelo todavía puede comprobarse examinando si la proposición $XYZ = nRT$ ofrece consecuencias comprobables. Además, si el factor $\overline{v^2}$ depende sólo de la temperatura del gas (ha de comprobarse), la Ec. (22.8) estará de acuerdo con la ley de Boyle: $PV = \text{constante}$ a una determinada T . Esto es, naturalmente, muy gratificante.

22.5 Consecuencias y comprobación de la teoría cinética

a) Veamos, en primer lugar, si la Ec. (22.9) es razonable desde el punto de vista de la *comprobación experimental directa*.

De la Ec. (22.8) o (22.9) resulta que $v^2 = (3PV/N_m m_0)$. Pero $N_m m_0$ = masa total del gas realmente presente y $(N_m m_0/V)$ = densidad ρ del gas (kg/m^3). Por tanto, podemos escribir, $\bar{v}^2 = 3P/\rho$ y $\sqrt{\bar{v}^2} = \sqrt{3P/\rho}$. La expresión $\sqrt{\bar{v}^2}$, a la que designaremos con el símbolo c , es la raíz cuadrada del valor medio de los cuadrados de las distintas velocidades —el valor *cuadrático medio* de las velocidades moleculares (velocidad c. m.). Matemáticamente, no coincide con el valor medio de la velocidad \bar{v} , pero realmente el valor de $\sqrt{\bar{v}^2}$ difiere en pocas unidades por ciento del valor medio* en los gases reales, es decir, $c \approx \bar{v}$.

Por tanto, según la predicción de nuestro modelo c o aproximadamente \bar{v} debe ser $= \sqrt{3P/\rho}$. Sustituyendo los valores representativos del aire a la presión de 1 atm ($1,01 \times 10^5 \text{ N/m}^2$) y 0°C ($\rho = 1,29 \text{ kg/m}^3$), resulta para c el valor

$$\sqrt{\frac{3 \times 1,01 \times 10^5}{1,29}} = 4,85 \times 10^2 \text{ m/s}$$

o sea, aproximadamente 500 m/s, comparable a la velocidad de una bala lenta**. (Ahora podemos confirmar las conclusiones de Herapath, según las cuales la velocidad media de las moléculas del vapor de agua, por ejemplo a 100°C , es superior a 1 milla/s.) Esta velocidad es enorme en comparación con el movimiento de los objetos comunes y resulta ser del mismo orden que la velocidad de propagación del *sonido* a dicha presión y temperatura (331 m/s). Las velocidades c. m. de las moléculas en otros materiales gaseosos a la misma temperatura y presión tienen, por cálculo, valores igualmente altos que oscilan desde 1800 m/s en el gas hidrógeno a 1900 m/s en el vapor de mercurio y, en tales casos, la velocidad del sonido no es mucho menor. Todo ello está en correspondencia con nuestro modelo gaseoso, pues

* Para apreciar la diferencia entre \bar{v} y c , obsérvese que si sólo hubiera tres moléculas con velocidades $v_1 = 5$, $v_2 = 10$ y $v_3 = 15$ unidades:

$$\bar{v} = \frac{5 + 10 + 15}{3} = 10 \text{ unidades,}$$

$$c \equiv \sqrt{\bar{v}^2} = \sqrt{\frac{5^2 + 10^2 + 15^2}{3}} = 10,8 \text{ unidades.}$$

La diferencia es del 8%.

** Bernoulli podía haber realizado su propio trabajo en este punto si hubiera dispuesto de buenas medidas de las densidades de los gases.

el modo obvio de pensar sobre la propagación de las ondas sonoras, es imaginarlas como un movimiento en una dirección superpuesto al movimiento caótico de las moléculas de modo que la energía de las ondas sonoras se propaga como energía cinética de una molécula a otra próxima con la que choca. Las propias moléculas, a pesar de su gran rapidez, no recorren grandes distancias durante un intervalo de tiempo apreciable por hallarse contenidas en un volumen relativamente pequeño a causa de sus múltiples choques (unos mil millones por segundo) con sus vecinas —en cambio, la energía de la onda sonora se comunica de una molécula a la siguiente con esa elevada velocidad.*

En cuanto a los valores numéricos citados, no podríamos esperar, realmente, que la velocidad del sonido fuera tan grande como la velocidad cuadrática media de las moléculas (¿por qué?); de hecho, pueden predecirse con gran precisión las diferencias numéricas, en la teoría completa de la propagación del sonido.

Problema 22.3 Dalton (primeramente meteorólogo) descubrió, experimentalmente, una ley relacionada con las presiones gaseosas, que ahora llamamos *ley de las presiones parciales de Dalton* y que puede establecerse así: Si en un recinto se mezclan varios (por ej., tres) gases a una determinada temperatura, la presión total P ejercida por todos ellos es igual a la suma de las presiones individuales (por ej., $P = P_1 + P_2 + P_3$) que cada uno ejercería si estuviera sólo en aquel recinto a la misma temperatura. Demostrar que nuestro modelo cinético está en armonía con esta ley.

(Sugerencia: Aceptar que la ley general de los gases es aplicable a las mezclas gaseosas. Según la Ec. (22.9), $P = \frac{2}{3} E_{c_{\text{tot}}} / V$ y observar que las energías cinéticas se suman por simple adición escalar.)

b) Volviendo a la línea principal del argumento, el hecho de que el resultado teórico de nuestro modelo ($PV = \frac{1}{3} N_m m_0 \overline{v^2}$) debe coincidir con los hechos experimentales de los gases ($PV = nRT$), nos sugiere buscar consecuencias derivadas y *comprobables* de la igualación de los dos segundos miembros de ambas ecuaciones, o sea

$$nRT \stackrel{?}{=} \frac{1}{3} N_m m_0 \overline{v^2}. \quad (22.10)$$

que puede escribirse en la forma

$$T \stackrel{?}{=} \frac{2}{3} \left(\frac{N_m}{nR} \right) \left(\frac{m_0 \overline{v^2}}{2} \right). \quad (22.11)$$

* Evidentemente, esta imagen de las moléculas restringidas por las colisiones mutuas a pesar de sus grandes velocidades individuales, explica también por qué el olor a perfume (que no es más que un enjambre de moléculas gaseosas que se evaporan del perfume líquido) se difunde tan lentamente por una habitación sin corrientes de aire. Esta explicación se adapta a una de las primeras objeciones a la teoría cinética.

Es decir, *la temperatura de un gas (en K) es proporcional a la energía cinética media de traslación por molécula de gas*. Éste es un resultado importantísimo y una interpretación fructífera del concepto de temperatura.

Además, obsérvese que el factor $\frac{2}{3}(N_m/nR)$ es una constante universal para todos los gases. En efecto,

$$\frac{N_m}{n} = \frac{\text{número de moléculas en una muestra determinada}}{\text{moles de gas en la muestra}}.$$

Sin embargo, el número de moléculas por mol es, por definición, el número de Avogadro, N , una constante universal. Por tanto,

$$\frac{2}{3} \left(\frac{N_m}{nR} \right) = \frac{2}{3} \frac{N}{R}.$$

Pero como hemos visto anteriormente, R es también una constante universal; por ello es conveniente y una costumbre escribir la última expresión en la forma

$$\begin{aligned} & \frac{2}{3} \frac{1}{k}, \quad \text{en donde} \\ k &= \frac{R}{N} = \frac{8,31 \text{ (joules/mol} \cdot \text{kelvin)}}{6,02 \times 10^{23} \text{ moléculas/mol}} = \\ &= 1,38 \times 10^{-23} \text{ (joules/kelvin} \cdot \text{molécula)}. \end{aligned}$$

(La constante universal k así definida es importantísima en muchas ramas de la física, y recibe el nombre de *constante de Boltzmann*, en honor del gran físico austriaco del siglo XIX cuyos trabajos han facilitado muchos avances en el campo de la física.)

Ahora podemos escribir Ec. (22.11):

$$\begin{aligned} T &= \left(\frac{2}{3k} \right) \frac{m_0 \bar{v}^2}{2} \\ &= (\text{constante}) \times (\overline{E_{c_{\text{tra}}}} \text{ por molécula}). \end{aligned} \quad (22.12)$$

Es decir, como k es una constante universal, resulta que *la temperatura de un gas es directamente proporcional a la energía cinética media de traslación por molécula para cualquier gas*. Ésta es, pues, la consecuencia de la proposición de que la Ec. 22.10 es correcta.

c) Consideremos otra de las muchas consecuencias de este último párrafo. A igual temperatura T , para dos tipos diferentes de gases (con valores m_1 y v_1 para uno de ellos y m_2 y v_2 para el otro) nuestra teoría requiere que

$$T = \frac{2}{3k} \frac{m_1 \overline{v_1^2}}{2} \quad \text{y} \quad T = \frac{2}{3k} \frac{m_2 \overline{v_2^2}}{2},$$

o sea

$$\frac{m_1 \overline{v_1^2}}{2} = \frac{m_2 \overline{v_2^2}}{2}. \quad (22.13)$$

Por tanto, a una temperatura determinada, las moléculas de un gas tienen la misma $\overline{E_{c_{\text{rms}}}}$ que cualquier otro gas, o sea,

$$\frac{\overline{v_1^2}}{\overline{v_2^2}} = \frac{m_2}{m_1} \quad \text{y} \quad \frac{\sqrt{\overline{v_1^2}}}{\sqrt{\overline{v_2^2}}} \equiv \frac{c_1}{c_2} = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}}, \quad (22.14)$$

lo que indica que la *razón de las velocidades c.m. de las moléculas de dos gases es igual a la raíz cuadrada de la razón inversa de sus masas*.

Esta conclusión es susceptible de un ensayo experimental inmediato. Si tomamos dos gases diferentes a iguales temperaturas, cada uno de ellos en su propio recinto rígido, con presiones iguales y abrimos en cada recinto un pequeño orificio que comunica con un espacio vacío, por el que pueden escapar las moléculas, el gas de masa molecular más ligera, que posee una velocidad c.m. más elevada, escapará con mayor rapidez que el gas más pesado, de menor velocidad c.m. Este experimento de *efusión* es, en principio, bastante posible y, aunque es en sí mismo difícil de realizar, el resultado prueba que, en efecto, la Ec. (22.14) es correcta.

Problema 22.4 La masa de una molécula de gas hidrógeno es a la masa de una molécula de gas nitrógeno como 2 : 28 (aproximadamente). ¿Cuáles son las velocidades relativas de efusión para dos de estos gases en condiciones iguales de temperatura, etc.?

Otra prueba de la Ec. (22.14) se encuentra en la *difusión* de dos gases distintos encerrados en un recinto con paredes porosas que le separan del vacío; el gas más ligero escapará más rápido que el más pesado. Esto había sido establecido empíricamente por Thomas Graham en 1830 y explicable ahora en términos teóricos.

Este proceso de difusión ha constituido la base de un tipo de separación, a gran escala, de los isótopos «ligeros» y «pesados» del uranio. Concretamente, el uranio (U) que se encuentra en la Naturaleza, está formado por una mezcla íntima de dos *isótopos*, o sea, dos elementos, químicamente semejantes, pero cuyos átomos

son de distinta masa. Uno de estos isótopos, el U-238, tiene un peso atómico aproximado de 238 y se encuentra en una proporción del 99,3% en el uranio natural. El otro isótopo más ligero, U-235, tiene un peso atómico aproximado de 235 y se encuentra en la proporción del 0,7% aproximadamente. Aún hay pequeñas trazas de un tercer uranio, U-234, pero en lo que ahora discutimos no es preciso tenerlo en cuenta. El problema histórico del «enriquecimiento» del uranio natural para su empleo en reactores nucleares o armas atómicas, es decir, el incremento de la abundancia relativa del U-235 con ayuda de la teoría cinética fue tratado por vez primera en el famoso *Smyth Report* de 1945*. Para una mejor comprensión del extracto siguiente, observar que la razón c_1/c_2 de la Ec. (22.14) corresponde también a la razón de los números de moléculas con estas velocidades respectivas que se desplazan a través de una barrera porosa de una vasija después de un corto intervalo de tiempo. Por ello, esta razón c_1/c_2 se llama también *factor de separación ideal* y se simboliza por α . El *Smyth Report* da estos detalles (págs. 115-116):

«Ya en 1896 Lord Rayleigh demostró que en una mezcla de dos gases de diferente peso atómico éstos podían separarse parcialmente por difusión a través de una barrera porosa en un espacio vacío. Debido a su mayor velocidad media, las moléculas del gas ligero se difunden a través de la barrera más rápidamente, con lo cual el gas que escapa se enriquece en el constituyente más ligero y el gas residual (el que no ha pasado a través de la barrera) se empobrece en el gas más ligero. El gas más enriquecido en el constituyente más ligero se difunde antes que el empobrecimiento del residuo sea apreciable. Si el proceso de difusión continúa hasta que casi todo el gas haya pasado a través de la barrera, el enriquecimiento medio del gas que escapa disminuye naturalmente... Con la hipótesis de que las velocidades de difusión son inversamente proporcionales a las raíces cuadradas de los pesos moleculares, el factor de separación para el gas que se difunde, el «factor de separación ideal», α será

$$\alpha = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}},$$

en donde m_1 es el peso molecular del gas ligero y m_2 el del pesado. Aplicando esta fórmula al caso del uranio, se ilustra la magnitud del problema de la separación. Como el propio uranio no es un gas, debe usarse algún compuesto gaseoso. El único apropiado es el hexafluoruro de uranio, UF_6 ... Puesto que sólo existe un tipo de átomos de flúor, F^{19**} , el hexafluoruro de uranio estará compuesto de una mezcla de U^{235}F_6 y U^{238}F_6 , de pesos moleculares aproximados, $M_1 = 349$ y $M_2 = 352$, respectivamente. Supongamos que una pequeña muestra del hexafluoruro se difun-

* H. D. Smyth, *A General Account of the Development of Methods of Using Atomic Energy for Military Purposes Under the Auspices of the United States Government*, 1940-1945. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, agosto 1945.

** De peso molecular relativo 19.

de a través de un tabique poroso; el gas que se difunde se enriquecerá en $U^{235} F_6$ en un factor

$$\alpha = \sqrt{\frac{352}{349}} = 1,0043."$$

Obsérvese que el enriquecimiento es sólo del 0,43% sobre las proporciones previas.

Algunas de las dificultades de este proceso de separación son evidentes, no siendo la menor la extracción química del uranio a partir del hexafluoruro de uranio. Otro punto serio es que el factor de separación α es demasiado bajo para permitir el uso del hexafluoruro de uranio débilmente enriquecido después de tal proceso. Por tanto, el gas de la primera etapa se hace pasar por otra barrera porosa que de nuevo discrimina contra el $U-238$ y en favor del favorito $U-235$. Como α continúa aproximadamente invariable, cada etapa simple cambia la abundancia relativa del $U-235$ en una cantidad pequeñísima. En palabras de Smyth:

«Para separar los isótopos de uranio hay que utilizar muchas difusiones sucesivas (o sea, en cascada)... Estudios recientes han demostrado que la mejor disposición para las sucesivas etapas de difusión, es hacer que en cada una de ellas se difunda en la siguiente la mitad del gas, y la otra mitad (empobrecida) pase a la etapa anterior... Si se desea un 99% de $U^{235} F_6$ ¹⁹, y utilizando una cascada en que cada etapa tenga un factor de enriquecimiento razonablemente alto, se requerirían unas 4000 etapas.»

En este reportaje se describe, de un modo sugestivo, la construcción, en 1945, de estas cámaras de difusión en una superficie de muchos acres, en Tennessee (fig. 22.5), Clinton Engineering Works, Oak Ridge, Tenn. En cierto sentido, la primera bomba atómica que utilizó $U-235$ fue una confirmación gigantesca de la teoría cinética que condujo a la Ec. 22.14 y a este proceso de difusión.

Una tercera prueba de la Ec. (22.14) en escala algo más modesta es la observación cuidadosa del movimiento browniano. Si observamos la agitación térmica de una partícula diminuta de polvo (masa m_1 , velocidad c.m. c_1) vemos que su movimiento de danza errática nunca alcanza las velocidades elevadas que poseen las moléculas del aire que le rodea. En efecto, la Ec. 22.14 nos dice que la velocidad c.m. c_1 de la partícula de polvo es igual a $c_2 \sqrt{m_2/m_1}$; y como m_2 , masa de las moléculas del aire es muchos millones de veces más pequeña que m_1 , masa de nuestra partícula de polvo, no es extraño que c_1 sea tan pequeña*.

Los cuerpos mayores que las partículas de polvo y el polen de las flores están naturalmente, bombardeados también por la atmósfera que los rodea; pero como

* De hecho, la dirección del movimiento de la partícula de polvo cambia tan rápidamente que es muy difícil observar directamente c_1 . Por esta razón, los intentos de justificar una teoría cuantitativa del movimiento browniano en la Ec. (22.14) en el siglo XIX resultaron inútiles.



Fig. 22.5 Central de difusión de Clinton Works (ahora Comisión de Energía Atómica) en Oak Ridge, Tennessee, para la separación de isótopos del uranio.

sus masas m_1 son todavía mayores, su velocidad c_1 es correspondientemente menor y su movimiento browniano es inapreciable. Sin embargo, espejos muy ligeros suspendidos delicadamente pueden utilizarse para mostrar la ligera agitación aleatoria del movimiento browniano.

22.6 Distribución de las velocidades moleculares

Consideremos otro enfoque sobre la Ec (22.12).

$$T = \frac{2}{3k} \cdot \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}.$$

Para cualquier gas podemos medir T , conocemos su masa por molécula m_0^* y hemos calculado ya k ; así pues,

$$c = \sqrt{v^2} = \sqrt{3kT/m_0}.$$

Si pudiéramos medir $\sqrt{v^2}$ directamente, comprobaríamos de inmediato la Ec. (22.12). Pero, ¿cómo vamos a hacer una medida de la increíble velocidad de las moléculas invisibles? Para preparar la respuesta, vamos a hacer una corta digresión.

Una de las formas más significativas en que el desarrollo de la teoría cinético-molecular ha influido en la ciencia moderna ha sido el demostrar que la conducta regular previsible a nivel macroscópico puede resultar del comportamiento irregular y aleatorio a nivel microscópico. Al admitir un «punto de vista estadístico de la Naturaleza», Maxwell y Boltzmann prepararon el camino de la teoría cuántica del siglo XX que llegaría a reemplazar la idea newtoniana del mundo como máquina.

Al principio del siglo XIX el aspecto determinista de la mecánica de Newton había sido destacado en el siguiente pasaje bien conocido del matemático francés Pierre Simon, marqués de Laplace (1749-1827):

«Debemos considerar el estado presente del Universo como el efecto de sus estados previos y como la causa del estado futuro. Si por un instante una mente pudiera comprender todas las fuerzas que animan la Naturaleza y la situación respectiva de los seres que la componen —una mente suficientemente vasta para someter estos datos al análisis— elegiría la misma fórmula para los movimientos de los cuerpos mayores del Universo que para los del átomo más ligero; para esta mente nada sería incierto y el futuro, como el pasado, estaría presente ante sus ojos.»

Irónicamente, esta afirmación fue hecha en el *Ensayo Filosófico acerca de las Probabilidades* de Laplace (1814), actuando como prefacio a una contribución principal e influyente a la teoría estadística. De los trabajos de Laplace y de sus contemporáneos Poisson y Gauss, surgió una poderosa serie de instrumentos para tratar los sucesos y los procesos que o son *aleatorios* o, aun siendo deterministas, son tan complicados que las hipótesis estadísticas resultan ser las más convenientes.

* La masa m_0 en gramos de una molécula de gas viene dada por

$$m_0 = \frac{\text{masa en gramos por mol de gas}}{\text{número de moléculas por mol}} = \frac{\text{número de gramos/mol}}{6,02 \times 10^{23} \text{ moléculas/mol}}$$

de acuerdo con la ley de Avogadro. Para el nitrógeno, por ejemplo, esto se reduce a

$$m_0 = \frac{28}{6,02 \times 10^{23}} = 4,65 \times 10^{-23} \text{ g/molécula.}$$

Uno de los resultados más útiles de la teoría estadística del siglo XIX fue la *ley de los errores* o *distribución normal*. De acuerdo con la ley de los errores, si cualquier magnitud puede variar aleatoriamente alrededor de cierto valor medio, la curva que muestra las frecuencias de las desviaciones respecto al valor medio es la familiar *curva en forma de campana* con un máximo en la región del valor medio y una fuerte pendiente a cada lado. Los estadísticos demostraron que la ley de los errores se aplica en muchos casos que abarcan una gran población; por ejemplo, en la distribución de alturas y pesos. Los alumnos están familiarizados con la ley porque se supone que se aplica usualmente en la distribución de las calificaciones en ejercicios y exámenes; los profesores utilizan a veces la curva de campana para decidir las calificaciones de sus alumnos.

Esta sugerencia de que las velocidades de las moléculas en un gas pueden distribuirse de acuerdo con una curva semejante fue realizada por Maxwell en su artículo de 1860 sobre la teoría cinética. Aunque se pensaba que los movimientos de las moléculas individuales venían determinados por las leyes de Newton, parecía imposible su determinación directa (o en el caso de que esto pudiera realizarse utilizar su información en el cálculo de las propiedades de los gases). Sin embargo, Maxwell comprobó que en física, como en los asuntos humanos, a menudo tenemos que sacar conclusiones, aunque falten la mayor parte de los detalles de relevancia. Una compañía de seguros puede establecer sus pólizas, sin conocer cuando una persona determinada que desea asegurarse va a morir; para ello cuenta con tablas de mortalidad que le dan una estimación de la vida probable de la gente a diversas edades. De igual modo, podemos calcular la presión media de un gas de muchas moléculas a partir de la teoría cinética sin que conozcamos los movimientos de cada molécula individual en el gas.

Maxwell proponía que las velocidades moleculares se distribuyen de una forma semejante a la ley de los errores. La curva que representa las magnitudes de las velocidades (fig. 22.6) es en realidad asimétrica, ya que existe un valor mínimo (cero), pero no uno máximo. Por la misma razón, la velocidad c.m. (Ec. 22.14) es mayor que la velocidad más probable (las velocidades más elevadas tienen un peso estadístico mayor al calcular la raíz cuadrada de la media de los cuadrados).

No es necesario que utilicemos la fórmula precisa matemática para la distribución de Maxwell* o que demos una rigurosa deducción de la misma. El punto crucial que debemos observar aquí es simplemente que las colisiones de las moléculas entre sí no tienden a igualar sus velocidades. Puede pensarse, a primera vista, que si una molécula lenta choca con una rápida, sus velocidades después de la co-

* De acuerdo con su distribución (ahora bien comprobada), la probabilidad relativa de que una velocidad molecular sea v es proporcional a $v^2 e^{-3mv^2/2kT}$, siendo $e = 2,718$. Cuando el exponente de e es un número negativo grande, correspondiente a energías cinéticas muy superiores al valor medio ($3kT/2$), la probabilidad es extraordinariamente pequeña, pero no nula.

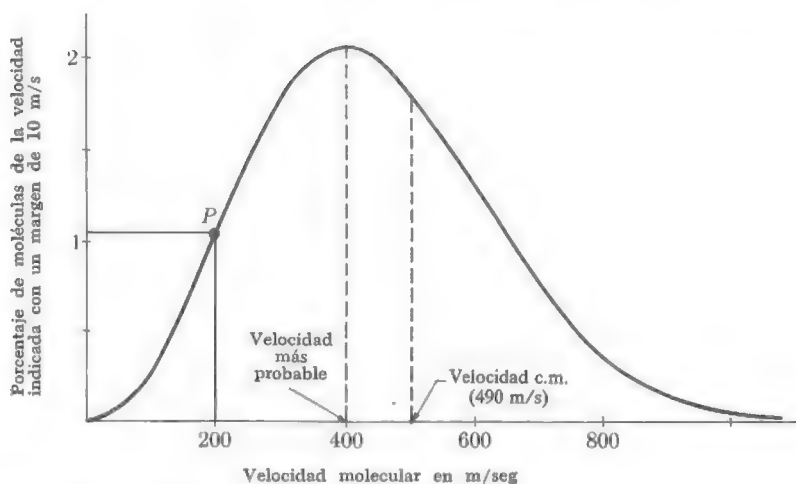


Fig. 22.6 Distribución de velocidades de las moléculas de nitrógeno a 0°C.

lisión estarán más próximas al valor medio de las velocidades antes de la colisión. Algunos científicos teóricos siguieron al principio esta línea de razonamiento, pero es falsa. El hecho real es que si dos moléculas de velocidades idénticas chocan, después del choque tienen velocidades distintas, como puede deducirse por aplicación de las leyes de conservación de la cantidad de movimiento y de la energía cinética a los choques elásticos.

Aunque la ley de distribución de Maxwell pronto se estableció como parte integrante de la teoría cinética, durante muchos años no pareció posible su comprobación experimental directa. Pero exactamente cuando un problema científico parece más paradójico y difícil —¿cómo medir las velocidades de las moléculas, si éstas son invisibles?— es cuando mayor ponderación obtiene de las mentes más inteligentes y, con frecuencia, se producen las soluciones más ingeniosas. Una técnica especialmente interesante, desarrollada por Otto Stern y otros en la década de 1920-30, requiere que se evaporen átomos de metal en todas las direcciones a partir de un alambre incandescente a temperatura conocida. El alambre está situado en el centro de un cilindro hueco que posee una ranura delgada que puede abrirse y cerrarse como un obturador rápido. Cuando la ranura está abierta un instante, sale por ella un haz fino y bien definido de átomos que escapan al espacio vacío que rodea el cilindro; si no se produce ninguna perturbación, continúan sus trayectorias en línea recta; los átomos rápidos se distanciarán de los más lentos, dispersándose así en una procesión que comenzó por ser un conjunto compacto de átomos.

Si todos los átomos chocan sobre una pantalla o lámina de vidrio, se condensarán sobre ella y constituirán una capa delgada de metal sobre un punto bien de-



Fig. 22.7 James Clerk Maxwell (1831-1879). (Cortesía de la Biblioteca del Trinity College, Universidad de Cambridge.)

finido. A fin de separar en la pantalla los átomos rápidos de los lentos, aquélla se desplaza en dirección transversal a la trayectoria, a medida que los átomos se van depositando; de este modo la capa se convierte en una mancha alargada en lugar de un punto con los átomos más rápidos sobre la cabeza del depósito y los más lentos en el extremo opuesto.

Es algo así como disparar una carga de perdigones contra un tren móvil en el momento justo en que pasa el primer vagón. Los perdigones más rápidos chocarán contra el primer coche, y los más lentos puede que choquen contra el último. De la distribución de los impactos a lo largo de todo el tren puede analizarse la distribución de velocidades de los perdigones.

No es posible contar simple y directamente cuántos átomos caen sobre cualquier parte de la placa móvil; pero, a partir de la geometría del dispositivo y co-



Fig. 22.8 Representación esquemática del aparato que mide la distribución de velocidades de las moléculas de gas.

nocido el movimiento de la lámina, se pueden calcular las velocidades absolutas (en m/s) necesarias para que un átomo alcance una determinada porción de la pantalla. Montando la lámina y el obturador en el interior de dos tambores rotatorios concéntricos con el filamento incandescente en el centro (véase fig. 22.8), se repite exactamente el proceso cada vez que los tambores dan una vuelta completa, con lo cual se pueden recoger muchas capas de átomos depositados sobre la misma placa. En estas condiciones la opacidad relativa o *densidad* medible de ennegrecimiento del depósito nos da directamente la *fracción* de átomos que tienen una velocidad determinada.

Lo primero que revela un examen cualitativo del depósito es la presencia en el haz atómico de todo tipo de velocidades, desde prácticamente cero a valores casi infinitos. El porcentaje de átomos (es decir, la densidad relativa del depósito) en los valores extremos es casi despreciablemente pequeño, pero crece progresivamente a medida que desviamos nuestra atención a la región más central del depósito. Para los átomos de plata evaporados de un filamento que se mantiene a una temperatura de varios cientos de grados por debajo del punto de fusión real del metal, la densidad máxima del depósito en los experimentos originales correspondió a aquella parte de la lámina donde la velocidad debía ser de $5,5 \times 10^3$ m/s. Esta es la *velocidad más probable*, que no coincide con la velocidad c.m.; de acuerdo con el trabajo teórico de Maxwell, la velocidad más probable es realmente menor que la velocidad c.m. (fig. 22.6). Para determinar esta última, se divide el depósito de la lámina en pequeñas regiones y se mide más exactamente qué fracción o porcentaje de átomos tienen velocidades de $0-1 \times 10^3$ m/s, $1-2 \times 10^3$ m/s, $2-3 \times 10^3$ m/s, etcétera. Así resulta que para un determinado vapor y una temperatura conocida, dentro del error de las medidas se cumple la siguiente *distribución* de velocidades*.

* Realmente, estos valores se aplican sólo a velocidades aleatorias como las que existen en un gas o vapor en una caja cerrada. Los átomos del haz descrito anteriormente poseen una distribución algo diferente, ya que el dispositivo obturador da automáticamente preferencia a un tipo de átomos (aquellos que tienen componentes de velocidad alta hacia la ranura). Los valores de la tabla se deducen así indirectamente de las medidas de densidad.

Intervalo de velocidades en 10^3 m/s		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6		
									más de
		6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13
% de átomos en el intervalo				0,5	3	7	11	15	16,5
		14	11,5	9	7	3	2	1	0,5

Esto puede representarse gráficamente como se indica en la fig. 22.9. De la figura se deduce en seguida que: *a)* los valores observados se agrupan alrededor del máximo, valor «más probable» y decaen aproximadamente a un 20% de este valor para velocidades dobles que la más probable, y *b)* la distribución de velocidades es completamente asimétrica por el lado de los valores más altos de velocidad. Incluso la velocidad media \bar{v} es mayor que la velocidad más probable, como puede comprobarse por cálculo.

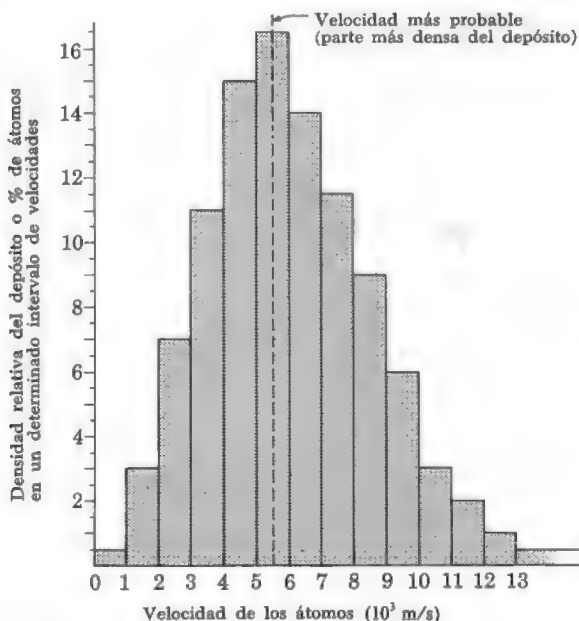


Fig. 22.9 Distribución de velocidades de los átomos de vapor de plata.

Además de confirmar la forma de la curva de distribución de velocidades prevista por Maxwell, el experimento de Stern demostró también que la velocidad c.m. coincide con el valor teórico calculado a partir de la teoría cinética (véase Ec. 22.12).

$$\sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}.$$

Este es el resultado final. Si realizamos el cálculo de la velocidad c.m. con estas medidas (¿cómo puede hacerse?), nuestro experimento nos da un valor aproximado de $6,5 \times 10^3$ m/s; por otra parte, el valor calculado de $\sqrt{\overline{v^2}}$, utilizando la ecuación deducida para este gas y para esta temperatura, ¡nos da el *mismo valor* dentro de los límites de error esperados!

Antes de volver a otro logro de la teoría cinética, formularemos, de nuevo, nuestros resultados. Para cálculos más exactos representaremos la fig. 22.8 nuevamente restringiéndola a intervalos de velocidad más pequeños hasta que la gráfica escalonada se convierta en una curva lisa como la de la fig. 22.6, que corresponde al gas nitrógeno a 0°C .

El significado de cualquier punto de la curva, por ejemplo P , es el siguiente: En este gas a esta temperatura sólo el 1,1% de todas las moléculas tienen velocidades en un intervalo de 10^3 cm/s centrado en 2×10^4 cm/s (es decir, tienen velocidades de 2×10^4 cm/s $\pm 0,5 \times 10^3$ cm/s). La fig. 22.10 representa la distribución de velocidades en un gas determinado para dos temperaturas diferentes.

Un concepto útil que surge de este estudio es la *probabilidad*. Diremos así que la probabilidad de que cualquier molécula de nitrógeno seleccionada al azar a una temperatura de 0°C tenga una velocidad de 200 m/s (± 5 m/s) es 0,011 (fig.

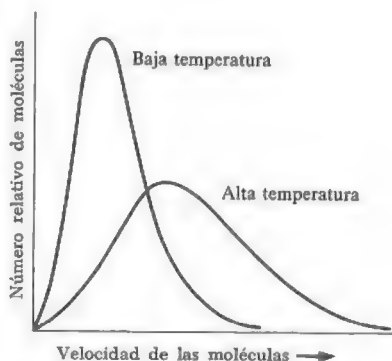


Fig. 22.10 Representación gráfica de la distribución de velocidades de las moléculas de un gas a dos temperaturas diferentes.

22.6). Este concepto significa, por tanto, que las observaciones previas de las diversas velocidades de muchas moléculas permiten predecir que de cada mil moléculas seleccionadas al azar, aproximadamente once tienen el intervalo de velocidad especificado. Si consideramos la velocidad de sólo cien moléculas, quizá una tendrá la velocidad deseada, pero cuanto más pequeña sea la muestra, menos previsible son los resultados. Para una *sola* molécula no podemos predecir ninguna velocidad, y lo más que puede afirmarse es la trivialidad de que su velocidad está comprendida entre cero e infinito; en efecto, todo este concepto de probabilidad no se aplica a una situación tan singular.

Problema 22.5 A partir de la fig. 22.6 determinar las probabilidades correspondientes dentro del intervalo especificado de la velocidad más probable, de la velocidad c.m. y de velocidades que sean dos y tres veces la más probable.

Obsérvese que aunque las probabilidades son cada vez más pequeñas en los extremos (alto y bajo), sus valores no son totalmente nulos; pueden encontrarse siempre unas pocas moléculas «precoces» (para temperaturas por encima del cero absoluto) que presentan velocidades enormes y, en consecuencia, energías extraordinarias, mientras que en todo momento existen otras pocas que se encuentran prácticamente en reposo. Unas curvas de distribución semejante son aplicables a líquidos e incluso a sólidos y explican por qué algunas moléculas, incluso a bajas temperaturas, son capaces de escapar (se «evaporan») de la superficie, tal como Clausius había sugerido en su teoría cualitativa (sección 22.2).

Problema 22.6 La ecuación 22.12 puede escribirse en la forma $\frac{3}{2} kT = \frac{1}{2} m_0 \overline{v^2}$. Por tanto, la $E_{c.m.}$ por molécula de cualquier gas es $\frac{3}{2} kt$, y, para todo gas,

$$E_{c.m.} \text{ por mol} = \left(\frac{3}{2} kT\right)N = \frac{3}{2} RT$$

a) Calcular esta energía (en joule) presente en un mol de vapor de agua (vapor recalentado) a 200°C; determinar también la cantidad de energía cedida (al émbolo en retroceso) por 9 g del vapor de agua que se expansiona en el cilindro de una máquina de vapor, enfriándose adiabáticamente hasta 100°C (se desprecian las pérdidas de calor a los alrededores).

b) Calcular también la cantidad de energía que debe eliminarse y podría utilizarse prácticamente si 1 mol de aire ordinario se enfriara desde la temperatura ambiente hasta -200°C en que sus componentes se licúan. ¿Por qué no se utiliza ordinariamente esta energía en forma de trabajo útil?

22.7 Otros resultados y comprobaciones de la teoría cinética

a) Una consecuencia importante de la Ec. (22.12) es que la $\overline{E_{c\text{tras}}}$ de un gas perfecto decrece linealmente a medida que la temperatura (en K) disminuye hacia cero; esto ofrece un significado físico al *cero absoluto de temperatura* que se define como la temperatura a la cual —muy crudamente— el movimiento térmico de las moléculas gaseosas ha cesado. (Esto no significa que haya cesado *todo* tipo de movimiento.)

b) De nuevo, en el aspecto cualitativo, uno de los objetivos más importantes de la teoría cinética fue explicar por qué un gas en un recinto térmicamente aislado (proceso adiabático) eleva su temperatura (absoluta) en proporción al trabajo realizado sobre él para reducir su volumen, por ejemplo mediante un émbolo que sea un lado del recinto. En efecto, fue este tipo de observación el primer fundamento para el establecimiento comprensivo de la ley de conservación de la energía. El trabajo realizado sobre el gas o la energía entregada a él por el avance del émbolo es igual al incremento de la energía cinética de traslación captada por las moléculas de gas en sus choques con el émbolo móvil. Pero según la Ec. (22.12), cualquier variación de la $\overline{E_{c\text{tras}}}$ se refleja en una variación proporcional de la temperatura: $\Delta \overline{E_{c\text{tras}}} \propto \Delta T$; de aquí la elevación proporcional de la temperatura.

El mismo argumento a la inversa explica por qué un gas (idealizado) se enfría al expandirse (no en el vacío, en cuyo caso no trabaja y la experiencia nos dice que no experimenta descenso neto de temperatura, sino sobre un émbolo que retrocede, o las paredes internas de un globo, o contra otro gas a menos presión o sobre algún «obstáculo» de este tipo). Un ejemplo familiar se presenta cuando una masa caliente de aire húmedo se eleva a una región más alta y se expande en aquella atmósfera más enrarecida, enfriándose hasta una temperatura tal que la humedad del aire se condensa para formar una nube de lluvia.

Si volvemos brevemente a la teoría cinética aplicada a líquidos, comprobaremos por qué la evaporación superficial enfría el resto del líquido; como sólo las moléculas más rápidas pueden vencer la atracción superficial y escapar por evaporación, la $\overline{E_c}$ media de las moléculas restantes disminuirá; por otra parte, un descenso en la $\overline{E_{c\text{tras}}}$ es, en efecto, equivalente a un descenso de T .

c) Un importante resultado de la teoría cinética que sólo trataremos brevemente es el que permitió realizar una estimación del *tamaño* de las moléculas individuales. Recordemos que Dalton trató de estimar los tamaños relativos de los átomos sobre la base del modelo falso de un gas estático, en el cual los átomos estaban en contacto. En la teoría cinética hemos supuesto que el volumen de las moléculas es despreciable y aparentemente se destruye toda esperanza de estimar tamaños. Sin embargo, existen diversos fenómenos que pueden tratarse con nuestro modelo sin hacer dicha suposición, específicamente: 1) el comportamiento presión-volumen

de los gases más densos y los vapores, donde el volumen molecular recupera su importancia y la ley de Boyle deja de cumplirse; 2) la velocidad de difusión de un gas en otro, en donde evidentemente el tamaño de los átomos determina la frecuencia de colisión y la facilidad y rapidez con que se difunden; 3) la velocidad de conducción del calor en un gas es otro ejemplo en el que el tamaño de los átomos determinará su progreso a pesar de los choques, y 4) el arrastre viscoso mensurable que un gas ejerce sobre un objeto que se mueve en su seno exige en sus cálculos el factor del tamaño molecular. Basta decir que cada uno de estos problemas lleva consigo enormes dificultades teóricas, algunas de las cuales constituyen todavía el tema de investigaciones fundamentales y que todas las líneas de evidencia, desde 1860 en adelante, convergen en el resultado de que los «diámetros» de las simples moléculas gaseosas son del orden de 10^{-10} a 10^{-9} m*.

d) Dalton comenzó el estudio de la teoría atómica intentando comprender por qué los gases de la atmósfera se hallaban tan perfectamente mezclados; veamos la solución que la teoría cinética da a este problema. Recordemos que Dalton explicaba la mezcla diciendo que se debía a un breve período inicial de desequilibrio entre átomos de distinto tamaño que se repelen mutuamente. La imagen cinética de los gases predice que dos o más gases mezclados como en la atmósfera se difunden entre sí en virtud del movimiento térmico de las moléculas. Sin embargo, y como una ironía, el gas más pesado (a saber, el oxígeno) debía encontrarse con una mayor abundancia relativa en los niveles inferiores que en los superiores de la estratosfera (¿por qué?). Aunque esto no se corresponde en absoluto con la marcada estratificación existente entre un líquido pesado y otro ligero —por ejemplo, agua y aceite—, es justamente el tipo de fenómeno que Dalton no creía posible. Y hay otra consideración más. Mientras las consecuencias de la teoría cinética en este punto se cumplen bien por una cantidad adecuada de gas en condiciones ideales, nuestra propia atmósfera está tan perturbada por las corrientes de aire que hacen que la proporción de los distintos gases que la componen sea la misma prácticamente para aquellas regiones accesibles a las medidas directas e indirectas. Es, después de todo, un cierto desequilibrio el que explica esta homogeneidad observada en la atmósfera, pero es un desequilibrio continuo, de un tipo totalmente distinto del que suponía Dalton en su explicación.

e) La teoría cinética nos lleva a una explicación directa de un asombroso conjunto de observaciones referentes al *escape de la atmósfera* de planetas y satélites.

* Evidentemente, debemos tener cuidado en no considerar con demasiado rigor el modelo molecular. El «diámetro» puede referirse sólo a cierta distancia media de máxima aproximación entre las moléculas. Para una descripción cualitativa de la determinación del tamaño y recorrido libre medio de las moléculas, véase T. W. Chalmers, *Historic Researches*, Londres; Morgan Brothers (1949), págs. 156 y siguientes. Una excelente descripción técnica se encuentra en T. G. Cowling, *Molecules in Motion*, Londres: Hutchinson, 1950.

Nuestra Luna y los planetas más pequeños, por la pequeñez de la atracción gravitatoria hace tiempo que perdieron sus atmósferas, si las tuvieron, y nuestra propia Tierra está perdiéndola continuamente, aunque tan lentamente que puede contrarrestarse con el barrido del gas interplanetario y del vapor de los meteoritos. El proceso de escape es evidente. La atmósfera, a causa de su peso, es más densa en las proximidades de la Tierra. Pero la densidad decrece rápidamente con la altura, y el recorrido libre medio (distancia media) de las moléculas entre las colisiones, aumenta también con la altura. Así, mientras el recorrido libre medio de las moléculas, al nivel del mar es sólo de 10^{-7} m, a una altura de 1000 km puede ya ser de muchos kilómetros. Allí las moléculas recorren a menudo grandes distancias en línea recta, y aquellas que se movieran alejándose de la Tierra con velocidades iniciales suficientemente elevadas (más de 10 km/s para esa altura), puedan alejarse suficientemente para no volver de nuevo por la atracción gravitatoria consiguiendo menor. Un vistazo a la fig. 22.6 muestra que para el nitrógeno a 0°C existen muy pocas moléculas que tengan tales velocidades. Sin embargo, siempre hay algunas moléculas a todas las velocidades y por ser mucho mayores (tal vez 1000°C) las temperaturas a aquellas alturas, el número de moléculas que por unidad de tiempo escapan de la atmósfera común será algo mayor de lo que pudiera parecer a primera vista, si bien sigue siendo prácticamente despreciable. Finalmente, cuanto menor sea el peso molecular mayor será la proporción de moléculas rápidas a una temperatura dada cualquiera, lo cual significa, en un caso extremo, que una molécula de hidrógeno es probable que escape de la Tierra solamente al cabo de mil años de haber sido liberada (en una descomposición química).

22.8 Calores específicos de gases

Veamos ahora uno de los más sorprendentes e intrigantes problemas de la teoría cinética (el intento de relacionar los movimientos internos de las moléculas con las propiedades térmicas mensurables de los gases).

Para determinar el calor específico de un gas (véase secc. 17.8), debemos tomar 1 g del gas, situarlo en un recinto rígido aislado del calor y suministrarle una determinada cantidad de energía térmica (en calorías) hasta que su temperatura se eleve un grado (en la escala centígrada o en la absoluta —en ambas un grado corresponde al mismo *intervalo*—). El calor específico* del gas s_v = calorías necesarias por gramo de gas, por $^{\circ}\text{C}$ de incremento de temperatura. Este experimento nos daría valores muy diferentes para gases distintos, 0,75 (cal/g)/grado para el helio, 2,41 para el hidrógeno, 0,15 para el dióxido de carbono, etc. En lugar de 1 g podíamos haber usado 1 mol de gas, definiendo así otro concepto relacionado, el calor molar,

* A volumen constante, con lo que no hay que tener en cuenta la cantidad de calor que se requeriría además para que el gas, al expandirse, realizara un cierto trabajo contra el exterior.

C_v , que es el número de (calorías/mol)/grado. Evidentemente, $C_v = s_v \times$ número de gramos por mol de gas $= s_v \times$ peso molecular relativo del gas.

En cualquier caso, nuestro modelo del gas nos dice que por cada caloría que suministramos, la $E_{c_{rms}}$ total de las moléculas se incrementa en 4,18 joule (ley de conservación de la energía); Q calorías de energía térmica incrementarían la $E_{c_{rms}}$ en $\Delta E_{c_{rms}} = QJ$ joule (en donde J es 4,18 joule/cal, equivalente mecánico del calor).

Consideremos 1 mol de gas que recibe Q calorías. Según la ecuación (22.12), la $E_{c_{rms}}$ por mol de este gas $= \frac{3}{2}RT$. Como la temperatura y la E_c total son linealmente proporcionales, $\Delta E_{c_{rms}} = \frac{3}{2}R\Delta T$; es decir, $\Delta E_{c_{rms}}/\Delta T = \frac{3}{2}R$. Según la ley de conservación de la energía, $\Delta E_{c_{rms}} = QJ$; por tanto, $QJ/\Delta T = \frac{3}{2}R$ y, finalmente

$$\frac{Q}{\Delta T} = 3 \frac{R}{2J}. \quad (22.15)$$

El primer miembro representa la energía térmica (cal) suministrada a este mol por grado de incremento de temperatura (pero ésta es exactamente la definición de C_v para un gas).

$$C_v = 3 \frac{R}{2J}. \quad (22.16)$$

Observamos, con asombro, que según nuestra teoría ¡el calor molar de todos los gases debería ser el mismo, ya que R y J son constantes universales! Específicamente, sustituyendo los valores de R y J , resulta

$$C_v = 3 \times \frac{8,31}{2 \times 4,18} = 3 \text{ (cal/mol)/grado} \\ \text{(muy aproximadamente)}$$

Determinemos C_v experimentalmente. En efecto, para el helio, argón y vapor de mercurio encontramos, respectivamente, que C_v vale 3,02, 2,95 y 2,94, y los valores de otros gases monoatómicos confirman esta teoría dentro de los límites tolerables.

¡Pero esto sólo es cierto para los gases *monoatómicos*! Para los diatómicos, como el hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, monóxido de carbono y cloruro de hidrógeno, los valores experimentales de C_v son próximos a 5 (cal/mol)/grado en lugar del valor 3 predicho. Para estos gases todo ocurre como si nuestra teoría se modificase de modo que

$$C_v \text{ (gases diatómicos)} = 5 \frac{R}{2J}.$$

En resumen, las moléculas diatómicas parecen tener una manera de absorber (recibir y almacenar) más energía por grado de elevación de temperatura que las moléculas monoatómicas. Cada caloría entregada a moléculas constituidas por un solo átomo se convertirá en energía de traslación, como era de esperar; pero cada calo-

ría entregada a una molécula diatómica parece dividirse en cinco partes —sólo tres partes pasan a energía de traslación y ocasionan la elevación de temperatura observada y las dos partes restantes se almacenan de alguna manera sin afectar a la $E_{\text{cin}} \dots$ o a la temperatura. ¿Cuál es la explicación física de esto?

Nos encontramos, pues, con un fallo en el modelo. Joule, que desarrolló la teoría hasta este punto, quedó sorprendido por las discrepancias que presentaban los calores específicos de los gases poliatómicos, y más aún puesto que en su tiempo ningún gas monoatómico había sido identificado todavía. Su primera idea fue pensar que los valores experimentales de C_v estarían equivocados; pero cuando nuevas determinaciones no hicieron sino mostrar más claramente las discrepancias entre los valores experimentales y teóricos, quedó tan desanimado, que todo trabajo posterior sobre la teoría cinética parecióle completamente inútil. Su modelo no había tenido en cuenta el que una molécula pudiese almacenar energía en otra forma distinta de la cinética de su movimiento de traslación, y en aquel tiempo ninguna razón había para que fuese revisada esta idea tan simple. Sin embargo, vamos a buscar un mecanismo plausible que explique la insospechada capacidad calorífica de los gases diatómicos. La solución fue encontrada por vez primera por Clausius en 1857. Una molécula monoatómica, podía muy bien considerarse como un átomo esférico cuya energía cinética es puramente de traslación. Pero en el caso de las diatómicas, había que considerarlas como un sistema análogo a las pesas de un gimnasio, formado por dos esferas correspondientes a los átomos, separadas por una distancia fija, dispositivo que posee una inercia rotacional muy superior a la de las «masas puntuales» individuales y que, por tanto, es mucho más capaz de ser puesto en rotación y de contener una cantidad significativa de energía cinética de rotación ($\frac{1}{2}I\omega^2$) a velocidades de rotación plausibles.

La fig. 22.11 muestra una representación esquemática muy simple de una molécula diatómica y sus tres tipos de rotación posibles, distinguidos unos de otros por las posiciones del eje de rotación (análogamente a nuestro método de diferenciar entre los tres posibles tipos de movimientos de traslación a lo largo de los ejes x , y , z).

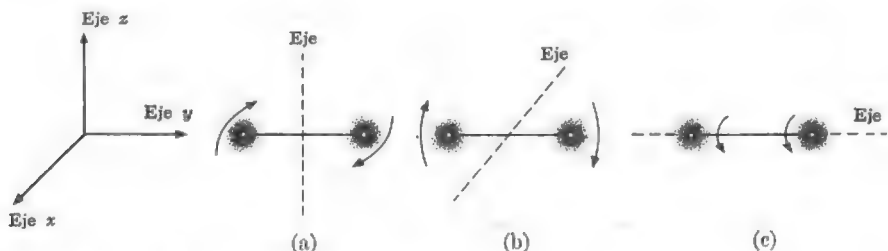


Fig. 22.11 Tres formas independientes, según las cuales puede girar una molécula diatómica.

Problema 22.7 Comparar la inercia de rotación de una molécula de hidrógeno (H_2) concebida: a) como una pequeña esfera según nuestro primer modelo, y b) como una molécula en forma de «pesa de gimnasia» con dos átomos (esféricos) iguales de hidrógeno separados aproximadamente una distancia de un diámetro atómico. [Nota: I depende del eje de rotación (véase fig. 22.11). Una molécula diatómica tiene un valor diferente en a) que en c).] Los valores numéricos de I se obtienen haciendo la hipótesis, basada en otros experimentos, de que el diámetro de un átomo simple de hidrógeno es, aproximadamente, 10^{-10} m y toda la masa del átomo, excepto una fracción $1/2000$, está concentrada en su centro, el núcleo, cuyo radio es, quizá, una diezmilésima del radio total del átomo.

Es útil introducir el término *grado de libertad de movimiento* para designar cada uno de los modos independientes en que una molécula determinada puede recibir energía. Por ejemplo, una molécula de gas monoatómico que *no* gire, tal como la representamos inicialmente, sólo puede adquirir energía cinética en virtud de su velocidad a lo largo del eje x , o del eje y , o del eje z . Estos tres movimientos son componentes independientes, en el sentido de que podríamos imaginar que una de ellas aumentara o disminuyera sin que las otras se vieran afectadas. Dicho de otro modo, la molécula tiene tres grados de libertad. Sin embargo, si consideramos una partícula constituida por dos o más átomos, capaz de tener movimiento de rotación además del de traslación, tendrá tres grados de libertad para la traslación *más* otros tres para los tres modos independientes posibles de rotación (alrededor de los tres ejes distintos indicados en la fig. 20.11), o sea seis grados de libertad en total.

Sin embargo, debemos estar preparados par afrontar la posibilidad de que, por alguna razón, una molécula no pueda hacer uso de todos los grados de libertad concebibles por consideraciones geométricas simples. Así, ya hemos negado implícitamente a la molécula monoatómica el uso de sus tres grados de libertad de rotación, que son geoméricamente concebibles, diciendo que su inercia rotatoria es demasiado pequeña para hacerlos eficaces, o que es una masa puntual— truco un tanto dudoso, sobre el que volveremos más adelante y de hecho, una manera velada de decir que para explicar los hechos experimentales del calor específico mediante nuestro modelo no necesitamos ni debemos admitir en éste la rotación de las moléculas de gases monoatómicos. Análogamente, si despreciamos la rotación de la molécula monoatómica, también deberíamos despreciar el grado de libertad de rotación de una molécula diatómica correspondiente al movimiento alrededor del eje longitudinal [fig. 22.11(c)]; por tanto, las moléculas de H_2 , N_2 , O_2 , CO , HCl , etc., deberían tener sólo cinco grados de libertad (tres para la traslación, dos para la rotación), o sea, dos grados más que las moléculas monoatómicas.*

* La existencia real del movimiento de rotación de las moléculas poliatómicas que no afecta a la presión ni a la temperatura, ha sido confirmada independientemente por experimentación directa del movimiento browniano y de la luz emitida por las moléculas en rotación.

Ésta es, pues, la explicación de por qué un mol de gas diatómico absorbe más energía por grado de elevación de temperatura que un mol de gas monoatómico. Por cada unidad de energía calorífica suministrada al primero, sólo $\frac{3}{5}$ se convierten en movimiento de traslación [$\Delta E_{c_{\text{tra}}}$, el cual, según la Ec. 22.12 da lugar a un incremento proporcional de temperatura] y los restantes $\frac{2}{5}$ de la energía suministrada se almacenan en los dos modos activos de rotación ($\Delta E_{c_{\text{rot}}}$, que no influye directamente en la elevación de temperatura). Por tanto, para elevar la temperatura de un mol de gas diatómico en un grado, debemos darle tanta energía como la requerida para un mol de gas monoatómico, *más* otra fracción ($\frac{2}{5}$ del total) para satisfacer los dos grados de libertad de rotación. Así resulta que C_v (gas monoatómico) = $3(R/2J)$, mientras que C_v (gas diatómico) = $5(R/2J)$.

Una nueva inspección de estas dos ecuaciones nos revela algunos hechos interesantes. Si tratásemos con gases poliatómicos de moléculas tan complejas para tener inercias rotacionales significativas respecto a los tres ejes de simetría, sería lógico que el tercer grado de libertad de rotación jugara también su papel. Con un total de 6 grados de libertad activos debería ser C_v (poliatómico) = $2 \times C_v$ (monoatómico) = $6(R/2J)$, o sea, aproximadamente 6(cal/mol)/grado. Realmente, muchos gases triatómicos *poseen* valores de C_v próximos a 6 (5,9 para el CO_2 a bajas temperaturas, 6,1 para el vapor de agua a 100°C). Otros gases poliatómicos tienen valores más altos todavía, indicando que otros grados de libertad despreciados hasta ahora comienzan a ser importantes: son aquellos que representan la *vibración* entre los componentes de la molécula. Por ejemplo, las moléculas complejas del éter etílico ($\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$) poseen un calor molar C_v próximo a 30. Así, la idea de grados de libertad del movimiento superpuesta a nuestro modelo inicial del gas nos permite interpretar muy satisfactoriamente los hechos experimentales del calor específico. Dentro de límites razonables podemos escribir

$$C_v = \delta \left(\frac{R}{2J} \right), \quad (22.17)$$

en donde δ = número de grados activos de libertad de movimiento para las moléculas del gas especificado.

Esta noción puede extenderse para explicar los calores específicos observados en los sólidos mediante la teoría cinética. Pero observemos el hecho sorprendente del calor específico de un gas como pista importante para determinar la estructura molecular de los gases, la misma información que faltó a Avogadro para proteger su teoría de las peores dudas. Por ejemplo, el hecho de que C_v para el gas hidrógeno sea ordinariamente 5(cal/mol)/grado nos demuestra que debe ser diatómico (no monoatómico como Dalton había pensado). De igual modo C_v para el vapor de mercurio es, aproximadamente, igual a 3(cal/mol)/grado, clara evidencia de su estructura monoatómica, incluso aunque otras evidencias (químicas) sean ambiguas o difíciles de obtener.

En los últimos párrafos está implícita una importante idea, *la equipartición de la energía* entre todos los grados activos de libertad de un gas; hemos supuesto que toda unidad de energía térmica suministrada a un mol de un gas se distribuye por igual a cada grado de libertad activo. En función de las moléculas individuales esto significa que para una determinada temperatura cada molécula de gas posee, por término medio, una energía de magnitud igual a $\frac{1}{2}kT$ para cada uno de sus grados de libertad (aproximadamente $1,88 \times 10^{-21}$ joule a 0°C). Por tanto, una molécula monoatómica típica (con $\delta = 3$) posee una energía total de $\frac{3}{2}kT$ por molécula (sólo energía de traslación y, por tanto, igual a $\frac{1}{2}mv^2$), las diatómicas poseen $\frac{5}{2}kT$ y las poliatómicas todavía más. Si se suministra al gas una energía externa ΔE , cada grado activo de libertad absorbe una parte igual de ΔE . Este principio de equipartición que hemos introducido para explicar las discrepancias observadas en los calores específicos se deduce con mayor rigor de los hechos experimentales y es de la mayor importancia en el estudio de los gases.

Finalmente, debemos examinar los puntos en que falla nuestra teoría cinética. Esperábamos tal posibilidad desde el principio, pues nuestro modelo gaseoso era muy simple y la introducción de la idea de los grados de libertad y de la equipartición de la energía puede no ser suficiente a largo plazo. Y no sólo esperábamos la inevitable deficiencia que aparece más pronto o más tarde en cada teoría, sino que la esperábamos con interés como pista para las modificaciones necesarias y como clave para las extrañas leyes que gobiernan el mundo de los átomos. Un tercio del entusiasmo en el estudio de la física reside en la elaboración de una teoría, otro tercio en su confirmación, y un tercero en avanzar más allá de la teoría.

El defecto fundamental de nuestra teoría puede resumirse en la siguiente paradoja: el principio de equipartición de la energía requiere la existencia de iguales cantidades de energía a una temperatura determinada por cada grado de libertad, excepto en aquellos grados de libertad (inactivos) donde no reside energía en absoluto, por ejemplo en el grado de rotación geoméricamente posible de las moléculas diatómicas a lo largo de su eje longitudinal. La pregunta que surge es: *¿qué es lo que determina exactamente si un grado de libertad es activo o inactivo?*

La situación aún se complicó más con el descubrimiento, en 1912, de que el hidrógeno, H_2 , tiene un calor específico notablemente diferente, a muy bajas temperaturas. A temperaturas ordinarias, el calor molar C_v es un poco inferior a $5(\text{cal/mol})/\text{grado}$ como corresponde a un gas diatómico. Pero a temperaturas inferiores, el valor de C_v desciende a unos $3(\text{cal/mol})/\text{grado}$ (a 100 K), ¡como si se tratara de un gas monoatómico (véase fig. 22.12)! Llegamos a la conclusión de que los dos grados de libertad de rotación se han «congelado». Nada en nuestra teoría hacía prever tan sorprendente comportamiento*. Y lo que es peor, cuando el gas

* Podría explicarse este fenómeno suponiendo que, a temperaturas muy bajas, los dos átomos que constituyen la molécula de hidrógeno se colocan tan próximos que su forma puede considerarse esférica, y no del tipo de pesas de gimnasio, pero demuestra la experiencia que las dimensiones moleculares varían muy poco al descender la temperatura.

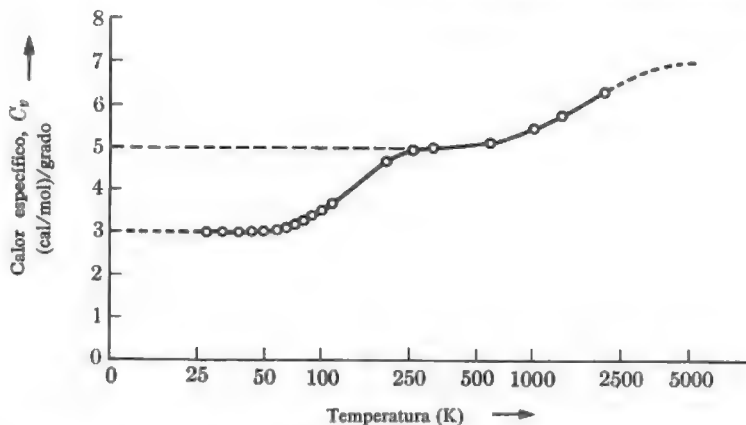


Fig. 22.12 Variación del calor molar C_v del gas hidrógeno molecular. (Para condensar la gráfica la temperatura del gas se representa a lo largo de la abscisa en escala logarítmica.)

H_2 u otros como el O_2 se calientan a temperaturas extraordinariamente altas, el valor de C_v , se incrementa por encima de $5(\text{cal/mol})/\text{grado}$ (a unos 2000°C) como si otros grados de libertad comenzaran a jugar un papel que no es usual a temperaturas ordinarias en las moléculas diatómicas.

La verdad es que estamos entrando en un territorio nuevo e inesperado; éste será el lazo de unión entre el concepto «clásico» del átomo según la teoría cinética y el concepto «moderno» que estudiaremos en la siguiente parte del texto. Sin embargo, podemos celebrar la perfección con que nuestro simple modelo mecánico se ajusta en tantos contextos (con la excepción de los calores específicos). La imagen de la «bola de billar» fue tan útil que parecía imposible cualquier revisión, a menos que fuese ligera. Sin embargo, esta esperanza fue en vano (la revisión vino acompañada de una revolución fundamental de la propia física). Este es el tema al cual volveremos en posteriores capítulos.

22.9 El problema de la irreversibilidad en teoría cinética: el diablillo de Maxwell

En el capítulo 18 estudiamos la tendencia hacia el flujo térmico irreversible en relación con el segundo principio de la termodinámica. Al deducir en este capítulo la ley general de los gases a partir de la teoría cinética, vimos la necesidad de suponer una tendencia similar hacia la igualación de temperaturas de la pared del recinto y de las moléculas de gas en su interior, que podría reflejarse en las lecturas de dos termómetros situados apropiadamente. Así pues, aceptábamos el hecho ob-

servado de que en estos casos los fenómenos no eran «simétricos» en el sentido de que si se toma una película de las lecturas termométricas el fenómeno es físicamente realizable sólo cuando tiene lugar en el sentido de avance en que ocurre espontáneamente y no en el sentido opuesto. Sin embargo, en el resto de nuestro estudio de la teoría cinética hemos aceptado la validez de la mecánica newtoniana la cual implica la reversibilidad completa. Es decir, admitíamos simetría entre las direcciones de tiempo positiva y negativa en los procesos físicos, en el sentido de que cuando se toma una película de la colisión perfectamente elástica de dos bolas de billar los fenómenos son físicamente realizables en cualquiera de los dos sentidos. Esta aparente incompatibilidad entre los principios básicos de la mecánica que hemos supuesto se aplican al nivel molecular, por una parte y el hecho indudable de que los procesos naturales observables son irreversibles por otra, constituyen la *paradoja de la reversibilidad*. La señaló William Thomson, en 1874, en el artículo que hemos citado al comienzo del capítulo 18 y también Josef Loschmidt en 1876.

Una solución bastante satisfactoria de la paradoja de la reversibilidad fue propuesta por Maxwell, Thomson y (mucho más elaboradamente) por Ludwig Boltzmann. Lleva consigo dos reconocimientos: la admisión sorprendente de que el principio de disipación de la energía (segundo principio de la termodinámica) *no* es una ley inviolable de la física —ocasionalmente y por cortos intervalos de tiempo puede violarse— y que en la mayor parte de las circunstancias ordinarias la probabilidad de tales violaciones es extraordinariamente pequeña.

Maxwell propuso un experimento mental para mostrar cómo podía violarse el segundo principio de la termodinámica por un ser imaginario que pudiera observar las moléculas individuales y sin consumo virtual de energía pudiera clasificarlas haciendo que el calor fluya de lo caliente a lo frío. Supongamos un recipiente que contenga un gas y esté dividido en dos partes *A* y *B* por un diafragma (partición sólida). Inicialmente, el gas en *A* es más *caliente* que el gas en *B*. Esto significa que las moléculas de *A* tienen velocidades *medias* superiores que las de *B*. Sin embargo, como las velocidades se distribuyen de acuerdo con la ley de distribución de Maxwell, unas pocas moléculas en *A* tienen velocidades menores que la media en *B* y unas pocas moléculas en *B* tienen velocidades mayores que la media en *A*.

Maxwell decía que con tal disposición y sin consumo de energía habría posibilidad de que el calor pasara desde un gas frío (como en b, fig. 22.13) a un gas caliente (lado *B* de la fig. 22.13) utilizando este solapamiento de las distribuciones para los gases a temperaturas distintas: «Supongamos ahora un ser finito», Maxwell decía, «que conozca las trayectorias y velocidades de todas las moléculas por simple inspección, pero que no pueda realizar trabajo alguno, excepto abrir y cerrar un agujero en el diafragma por medio de una lámina sin masa». (Si la lámina u obturador no tiene masa, no habrá que efectuar trabajo para moverlo.) Supongamos que este «ser finito» —al cual se ha llamado posteriormente «diablillo de Maxwell»— observa las moléculas de *A* y cuando ve que se acerca una con una velocidad menor que la media en *B* abre el agujero y la deja pasar. Ahora la velocidad media

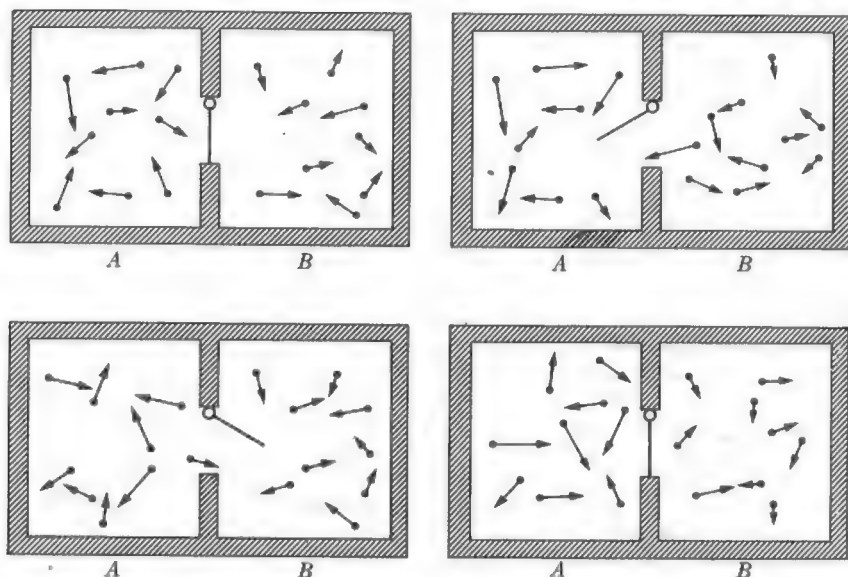


Fig. 22.13 Operación del diablillo de Maxwell.

a) Inicialmente la E_c media de las moléculas es mayor en A. b) El obturador está abierto de tal forma que sólo las moléculas rápidas pasan de B a A. c) Sólo las moléculas lentas pasan de A a B. d) La E_c media en A crece y la E_c media en B decrece.

de las moléculas en B será menor que antes. A continuación observa una molécula de B cuya velocidad es mayor que la media en A, y cuando se acerca al agujero levanta la lámina y permite su paso. La velocidad media en A será más alta que antes. Maxwell concluye:

«El número de moléculas en A y B continúa siendo el mismo que al principio, pero la energía en A se ha incrementado y en B ha disminuido, es decir, el sistema caliente es ahora más caliente y el frío es más frío y, sin embargo, no se ha realizado ningún trabajo; sólo ha actuado la inteligencia de un ser muy observante y habilidoso.»

Así, el experimento mental de Maxwell muestra que si hubiera algún modo de clasificar por inspección las moléculas individuales, el principio de disipación de la energía podría violarse.

El hecho de que el diablillo de Maxwell opera creando orden a nivel molecular —colocando las moléculas rápidas en una caja y las lentas en otra— sugiere, recíprocamente, que los procesos usuales de disipación de la energía llevan consigo un incremento de la cantidad de *desorden* o *aleatoriedad* de un sistema. Boltzmann

hizo explícita esta idea desarrollando una definición precisa de la entropía en función de las probabilidades de las distribuciones moleculares. Encontró que si la entropía de un estado viene definida por

$$S = k \log W,$$

siendo W el número de posibles distribuciones moleculares correspondientes a un estado, la entropía media tiene las mismas propiedades que la entropía definida por Clausius (ver secc. 18.4). Los estados desordenados de un sistema son aquellos que pueden tener un gran número de distribuciones moleculares, con lo que W y $\log W$ son ambos grandes como en un gas ordinario; los estados ordenados sólo pueden tener un número pequeño de posibles distribuciones (por ejemplo, en el caso de un sólido a la temperatura del cero absoluto, si sólo existiera una distribución molecular posible, $W = 1$, la entropía sería cero).

Boltzmann decía que si se pudiera hacer una lista de todas las distribuciones posibles que pueden adoptar las moléculas de un gas en un recinto (por ejemplo, haciendo muchas «instantáneas»), casi todas ellas tendrían que considerarse «desordenadas». Por ejemplo, en sólo unos pocos casos todas las moléculas estarían en una esquina de un recinto y el resto quedaría vacío, o todas las moléculas rápidas estarían en un lado y las lentas en el otro. Lógicamente, si partimos de una estructura ordenada de moléculas en un gas, con el tiempo la distribución se hará menos ordenada; las distribuciones al azar tienen la ventaja de poseer una alta probabilidad. De igual modo, si disponemos un cuerpo caliente en contacto con otro frío, es casi seguro que al cabo de un corto tiempo ambos tendrán la misma temperatura, simplemente porque de este modo existen muchas más posibles distribuciones en las cuales moléculas rápidas y lentas se mezclan mutuamente que distribuciones con la mayor parte de las moléculas rápidas en un lugar y la mayor parte de las moléculas lentas en otro.

Para ilustrar el argumento de Boltzmann consideremos lo que sucede al mezclar una baraja. Si sólo hubieran dos cartas, A y B (análogamente a dos partículas que chocan), una de las posibles distribuciones (a saber, AB o BA) es tan probable como la otra. Pero si tenemos muchas cartas, el caso es distinto; la mayor parte de las distribuciones posibles de las cartas que ocurren son más o menos desordenadas, mientras las distribuciones ordenadas tienen lugar muy raramente en unas cartas bien mezcladas. Si *partimos* de una distribución ordenada —por ejemplo las cartas ordenadas por palos o por números—, el mezclado dará lugar casi siempre a una distribución más desordenada. La aleatoridad tendrá la máxima probabilidad. Es muy raro que un jugador reciba doce cartas del mismo palo de una baraja bien mezclada, y aunque esto es posible, es *casi* seguro que no ocurrirá en la vida real.

De acuerdo con el punto de vista de Boltzmann, es casi seguro que el desorden (entropía) se incrementa en cualquier proceso físico entre las moléculas. El segundo principio es, por tanto, una ley estadística que se aplica a colectividades de muchas



Fig. 22.14 Ludwig Boltzmann (1844-1906).

moléculas, pero que no tiene significado cuando se aplica a una sola molécula. Sin embargo, como se trata de una ley estadística, existe una remota posibilidad de que pueda ocurrir una fluctuación bastante grande, en la cual la energía se concentra en lugar de disiparse. Por ejemplo, las moléculas de un vaso de agua están normalmente moviéndose al azar en todas las direcciones; sin embargo, no es completamente imposible que en un momento determinado todas ellas se movieran en la misma dirección. El agua saltaría del vaso. (Si tuviéramos el vaso en la mano, éste se movería hacia abajo en virtud del principio de conservación de la cantidad de movimiento.) En tal caso un movimiento desordenado se habría convertido espontáneamente en uno ordenado; la entropía decrece en lugar de incrementarse, y el se-

gundo principio de la termodinámica quedaría violado (si se le considerase como una ley absoluta de la física). Tales grandes fluctuaciones son muy poco probables; sin embargo, si reconocemos que pueden ocurrir, es porque el segundo principio tiene unos límites que no aparecen en otras leyes fundamentales de la física.

22.10 La paradoja de la recurrencia

En sus intentos de probar la estabilidad de la «máquina del mundo de Newton» los físicos matemáticos del siglo XVIII habían llegado a la conclusión de que las perturbaciones gravitatorias de las órbitas planetarias no podían producir un cambio continuo en la misma dirección sobre ningún planeta, sino que tendrían un efecto cíclico. Así, la Tierra no se acercaría gradualmente al Sol en un largo período de tiempo, ni tampoco se alejaría; en su lugar, su órbita oscilaría entre límites definidos, interno y externo. Este resultado fue utilizado por Playfair para justificar las teorías geológicas de Hutton (secc. 18.2), pero en 1860 William Thomson planteó algunas dudas al apuntar que los cálculos eran sólo aproximados. En 1889 el matemático francés Henri Poincaré atacó de nuevo el problema utilizando métodos más precisos y probó que *todo* sistema mecánico, sujeto a las leyes de Newton, sean o no las fuerzas gravitatorias, debe ser cíclico en el sentido de que volverá a una configuración inicial (conjunto de posiciones y velocidades de todas las partículas) cualquiera. Sin embargo, la demostración estaba sujeta a la condición de que el sistema esté restringido a un espacio finito, así como fija su energía total.

Poincaré reconoció que su *teorema de recurrencia*, si se aplica al nivel molecular, contradice el principio de disipación de la energía, ya que un gas encerrado en un recinto volvería a cualquier estado inicial ordenado si el teorema de recurrencia se cumpliera a este nivel. También a nivel cósmico el teorema implica que si el Universo experimentara una muerte térmica por igualación de temperaturas, posteriormente volvería a revivir. Poincaré escribió:

«Un mundo limitado, gobernado sólo por las leyes de la mecánica, pasará siempre por un estado muy próximo al inicial. Por otra parte, de acuerdo con las leyes experimentales aceptadas (si se les atribuye una absoluta validez y se desea llevar sus consecuencias hasta el extremo), el Universo tiende a un cierto estado final, del cual no se apartará nunca. En este estado final, que es una especie de muerte, todos los cuerpos estarán en reposo a igual temperatura...

«...Las teorías cinéticas pueden desembarazarse a sí mismas de esta contradicción. De acuerdo con ellas, el mundo tiende al principio hacia un estado en el que permanece largo tiempo sin cambio aparente; y esto concuerda con la experiencia; pero no permanece así siempre;... simplemente permanece allí durante un tiempo enormemente largo, tanto más largo cuanto más numerosas sean las moléculas.

Este estado no será la muerte final del Universo, sino una especie de sueño, del cual despertará después de millones de siglos.

»De acuerdo con esta teoría, para ver pasar el calor de un cuerpo frío a otro caliente no será necesario tener la visión aguda, la inteligencia y la destreza del diablillo de Maxwell; bastará tener un poco de paciencia.»

Aunque Poincaré era partidario de aceptar la posibilidad de una violación del segundo principio después de un tiempo muy largo, otros fueron menos tolerantes. En 1896 Ernst Zermelo (en aquel tiempo alumno de Max Planck) publicó un artículo atacando no sólo la teoría cinética, sino también la concepción mecanicista del mundo en general sobre la base de que contradecía el segundo principio. Boltzmann replicó repitiendo sus primeras explicaciones de la naturaleza estadística de la irreversibilidad y apuntando que las recurrencias previstas por el teorema de Poincaré quedarían tan alejadas en el futuro que no tendrían efecto práctico alguno en la aplicación del segundo principio a los procesos ordinarios. Como estos argumentos no dejaron satisfecho a Zermelo, Boltzmann (mitad en serio) propuso la siguiente hipótesis: La historia del Universo es realmente cíclica, por lo que la energía de todas sus moléculas deberá reconcentrarse para comenzar el ciclo siguiente. Durante este proceso de reconcentración, todos los procesos naturales volverán hacia atrás, como se describe en la cita de William Thomson (capítulo 18). Sin embargo, el sentido humano del tiempo depende de los procesos naturales que siguen adelante en nuestro propio cerebro. Si estos procesos se invierten, nuestro sentido del tiempo también se invertirá. Por tanto, nunca podríamos observar «la marcha hacia atrás del tiempo», porque ello significaría que ¡nosotros iríamos hacia atrás con el tiempo!*

En la disputa entre Boltzmann y Zermelo se vio, finalmente, que ambos tenían en parte razón y en parte estaban equivocados. Zermelo y otros críticos de la teoría atómica como Ernst Mach tenían razón en su creencia de que una descripción microscópica completa de la materia no puede basarse sólo en las leyes de Newton de la mecánica. Los gases no son conjuntos de pequeñas bolas de billar sin estructura interna, según Maxwell decía como resultado de la discrepancia de los valores específicos. Sin embargo, Boltzmann estaba en lo cierto respecto a la utilidad del modelo molecular; la teoría cinética es correcta, excepto en aquellas propiedades que relacionan la estructura detallada de átomos y moléculas.

En 1905, Albert Einstein indicaba que las fluctuaciones previstas por la teoría cinética no necesitaban ser tan raras como Poincaré y Boltzmann pensaban; podrían producir un efecto que puede observarse y medirse experimentalmente de

* La teoría de Boltzmann ha resurgido en algunas discusiones cosmológicas recientes de la hipótesis del *big-bang*. La actual fase de expansión del Universo puede venir seguida de una contracción (durante la cual se invertirían los sentidos subjetivos del tiempo) que daría lugar a un colapso y después a otra explosión y así sucesivamente.

modo cuantitativo: el *movimiento browniano* de pequeñas partículas suspendidas en un fluido. Estudios posteriores inspirados por la teoría de Einstein, en particular por el físico francés Jean Perrin, comprobaron las predicciones cuantitativas deducidas de la teoría cinética y al mismo tiempo proporcionaron otro método para determinar tamaños moleculares. Este nuevo éxito reforzó el punto de vista estadístico de la Naturaleza, pero dejó abierta la cuestión de si las leyes básicas de la Naturaleza son irreversibles a nivel atómico. La cuestión es todavía un tema de vivo interés entre los físicos de hoy.

Textos recomendados para lecturas posteriores

Ludwig Boltzmann, «On the relation of a general mechanical theorem to the second law of thermodynamics», traducido al inglés en S. G. Brush. *Kinetic Theory*, vol. 2, New York: Pergamon, 1966.

H. A. Boorse y L. Motz, *The World of the Atom*, New York: Basic Books, 1960. Véanse en págs. 195-274 los extractos escritos de Herapath, Brown, Waterston, Joule y Maxwell.

Rudolf Clausius, «The nature of the motion which we call heat», traducido al inglés e impreso en S. G. Brush, *Kinetic Theory*, vol. 1, New York: Pergamon, 1965.

T. G. Cowling, *Moléculas in Motion*, London: Hutchinson, 1950; reimpresso por Harper Torchbook. Unos elementales conocimientos para comprender la exposición de la teoría cinética.

E. C. Kemble, *Physical Science*, capítulo 16.

H. Poincaré, «Mechanism and experience», traducción inglesa en Brush, *Kinetic Theory*, vol. 2.

Project Physics Reader, vol. 3. Artículos de Kenneth W. Ford, George Gamow, Robert M. Coates, Jacob Bronowsky y James R. Newman que tratan de conceptos estadísticos en la teoría cinética, irreversibilidad, diablillo de Maxwell y la vida de Maxwell. Véase, también, en el mismo volumen «La gran teoría molecular de los gases» por Eric M. Rogers para una discusión viva de algunas aplicaciones de la teoría y «Aleatoriedad y siglo XX» de Alfred M. Bork.

Fuentes, interpretaciones y trabajo de referencia

Rudolf Arnheim, *Entropy and Art, an essay on order and disorder*, Berkeley: University of California Press, 1971.

Ludwig Boltzmann, *Lectures on Gas Theory*, traducción inglesa de la edición 1896-98 de S. G. Brush, Berkeley: University of California Press, 1964.

S. G. Brush, «The development of the kinetic theory of gases», *Annals of Science*, volumen 13, págs. 188-198, 273-282 (1957), vol. 14, págs. 185-196, 243-255 (1958); *American Journal of Physics*, vol. 29, págs. 593-605 (1961), vol. 30, páginas 269-281 (1962). *Kinetic Theory*, New York: Pergamon Press, 3 vols., 1965-1972, incluye separatas y traducciones de artículos de Clausius, Maxwell, Boltzmann, William Thomson, Poincaré, Zermelo y otros. «James Clerk Maxwell and the Kinetic Theory of Gases: A Review Based on Recent Historical Studies», *American journal of Physics*, vol. 39, págs. 631-640 (1971).

A. S. Eddington, *The Nature of the Physical World*, Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1928, capítulo IV.

Paul y Tatiana Ehrenfest, *The Conceptual Foundations of the Statistical Approach in Mechanics*, traducido por M. J. Moravcsik de un artículo de enciclopedia publicado en 1912, Ithaca, New York: Cornell University Press, 1959.

M. Eliade, *Cosmos and History: the Myth of the Eternal Return*, traducido del francés por W. R. Trask, New York: reimpression por Tarper Torchbook, 1959.

E. W. Garber, «Clausius and Maxwell's kinetic theory of gases», *Historical Studies in the Physical Sciences*, vol. 2, págs. 299-319 (1970).

M. J. Klein, «Maxwell, his Demon, and the second law of thermodynamics», *American Scientist*, vol. 58, págs/ 84-97 (1970).

R. Schlegel, *Time and the Physical World*, New York: Dover Pubs., 1968.